



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA

# MEDICIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE BURBUJA EN UN RESALTO HIDRÁULICO

Autor: Pablo Mora Esteban

Tutor: Fco. Javier Rodríguez Rodríguez

Leganés, junio de 2012



**Título:** Medición de Características de Burbuja en un Resalto Hidráulico

**Autor:** Pablo Mora Esteban

**Director:** Fco. Javier Rodríguez Rodríguez

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que de alguna manera han tenido un papel importante dentro del desarrollo de este proyecto.

En primer lugar quisiera destacar a mi familia, por su apoyo incondicional, por su paciencia y comprensión y por facilitarme en todo lo que han podido las cosas.

Mención especial a mi tutor de proyecto, Javier Rodríguez, por su empeño a la hora de resolver los diferentes problemas que han ido surgiendo, por su claridad en las explicaciones y por su gran comunicación. Ha sido un placer trabajar con él.

Al profesor Pablo Legazpi, por su gran ayuda dentro del laboratorio.

Gracias a todos



# Resumen

La investigación de los flujos multifásicos se ha incrementado considerablemente en los últimos años debido a su gran interés para investigadores e ingenieros químicos, hidráulicos, de costas y medioambientales. A pesar de haberse conseguido grandes avances mediante nuevos modelos numéricos y herramientas computacionales más potentes, aún siguen sin poder resolverse muchos de los problemas prácticos como las previsiones meteorológicas o la rotura de olas en las playas. Sin embargo, los recientes y significativos avances en técnicas experimentales como la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) o las sondas de conductividad y ópticas, permiten una mayor precisión en la obtención de los parámetros del flujo.

En este proyecto se ha estudiado un flujo multifásico clásico, el resalto hidráulico, en el que se realizará la caracterización experimental de determinadas características de las burbujas (concentración, velocidad y tamaño) que se forman dentro del resalto hidráulico, empleando sondas ópticas parcialmente sumergidas.

El resalto hidráulico se ha reproducido en el canal hidrodinámico del laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid empleando un obstáculo en el fondo del canal mediante el cual se consigue cambiar el flujo a régimen supercrítico.

En las diferentes mediciones realizadas, los datos recogidos por la sonda óptica de doble punta han sido registrados y analizados con ayuda del software comercial PV6D (Particle Velocity Measurer) y mediante el programa de cálculo MATLAB. En éste último se ha realizado un elaborado código de programación mediante el cual se rastrea automáticamente en todas las señales proporcionadas por la sonda en busca de indicios de burbuja, y una vez detectadas permite calcular las características más relevantes de las mismas. Se describirán las ventajas e inconvenientes de cada uno de los métodos y también se establecerá una comparativa de los valores arrojados por ambos.





# Índice general

Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vii
1    Introducción.....	2
1.1    Flujos multifásicos y el resalto hidráulico .....	2
1.2    Modelado físico del resalto hidráulico.....	11
1.3    Escalas y estructuras en flujos turbulentos.....	15
2    Instalación experimental .....	21
2.1    Elementos del canal experimental .....	21
2.2    Método empleado para la formación del resalto.....	24
2.3    Elementos de adquisición de datos .....	26
2.3.1    Sonda óptica .....	26
2.3.2    Módulo opto-electrónico .....	28
2.3.3    PC con tarjeta de adquisición .....	28
3    Determinación de las características de las burbujas mediante sondas ópticas.....	30
3.1    Reseña histórica de técnicas de medición .....	30
3.2    Técnica de medida mediante sondas óptica .....	40
3.3    Principio de la sonda óptica .....	42
4    Análisis de datos .....	48
4.1    Software de análisis .....	48
4.2    Diferencias entre PV6D y MATLAB .....	49

4.3	Obtención características de las burbujas .....	54
4.3.1	Fracción de vacío .....	54
4.3.2	Autocorrelación .....	59
4.3.3	Correlación cruzada .....	67
4.3.4	Velocidad de burbuja .....	68
4.3.5	Diámetro de burbuja.....	71
5	Resultados .....	74
5.1	Procesamiento de señales.....	74
5.1.1	Coeficiente de correlación.....	77
5.1.2	Relación de diámetros, $D/d$ .....	78
5.2	Resultados .....	78
6	Conclusiones .....	81
	Glosario .....	84
	Referencias.....	85

# Índice de figuras

Figura 1.1. Entrada de aire en rotura de oleaje .....	3
Figura 1.2. Esquema de un resalto hidráulico.....	4
Figura 1.3. Resalto hidráulico en los experimentos de la Universidad Carlos III de Madrid (Escuela Politécnica Superior), flujo de izquierda a derecha .....	5
Figura 1.4. Resaltos hidráulicos en corrientes naturales, Québec (Canada).....	5
Figura 1.5. Gran inundación del río Todd en Alice Springs (NT, Australia) .....	9
Figura 1.6. Resalto hidráulico amortiguando la cuenca y el vertedero de una presa .....	9
Figura 1.7. Piragüismo en un kayak, Colligan.....	10
Figura 1.8. Surfista y ola rompiendo, Plage du Minou .....	10
Figura 1.9. Resalto hidráulico con flujo de izquierda a derecha. Condiciones del flujo: $Fr = 1,35$ , $d1 = 90$ mm .....	14
Figura 1.10. Resalto hidráulico con flujo de izquierda a derecha. Condiciones del flujo: $Fr = 7$ , $d1 = 24$ mm .....	15
Figura 1.11. Ejemplo de formación de vórtices .....	16
Figura 1.12. Agrupación de burbujas en la dirección del flujo.....	17
Figura 1.13. Esquemas de la función de autocorrelación y correlación cruzada para una sonda de doble punta .....	19
Figura 2.1. Canal hidrodinámico .....	22
Figura 2.2. Instalación experimental .....	22
Figura 2.3. Esquema de la instalación.....	23
Figura 2.4. Cajas de control de accionamiento de las bombas .....	24
Figura 2.5. Detalle del obstáculo que provoca el resalto.....	25
Figura 2.6. Formación del flujo supercrítico antes del resalto hidráulico .....	25
Figura 2.7. Esquema de la instrumentación.....	26
Figura 2.8. Sonda óptica de doble punta .....	27
Figura 2.9. Detalles sonda óptica.....	27
Figura 2.10. Módulo opto-electrónico .....	28

Figura 3.1. Formación de la capa límite en un resalto hidráulico .....	33
Figura 3.2. Esquema de una sonda de conductividad de una punta .....	34
Figura 3.3. Perfiles verticales de C y F dentro del resalto hidráulico .....	35
Figura 3.4. Sonda de conductividad de doble punta .....	36
Figura 3.5. Sonda de fibra óptica en un flujo burbujeante .....	37
Figura 3.6. Velocimetría Láser Doppler (LDV) .....	38
Figura 3.7. Sonda microADV .....	39
Figura 3.8. Diferentes tipos de sondas utilizadas para las mediciones de la dinámica de fluidos en flujos monofásicos y multifásicos .....	41
Figura 3.9. Principio de funcionamiento de la sonda .....	42
Figura 3.10. Esquema del divisor en Y del módulo opto-electrónico .....	43
Figura 3.11. Señal de la sonda por el paso de burbuja .....	44
Figura 3.12. Caso ideal experimental de burbuja atravesando la sonda .....	45
Figura 3.13. Pérdida de señal en el segundo canal .....	46
Figura 4.1. Presentación de las señales en PV6D .....	49
Figura 4.2. Presentación de las señales en MATLAB .....	50
Figura 4.3. Intervalo con señales ocultas .....	51
Figura 4.4. Señales ocultas .....	51
Figura 4.5. Señal en MATLAB con pequeños intervalos de ruido .....	52
Figura 4.6. Presentación de resultados en PV6D .....	53
Figura 4.7. Umbral sobre la señal en bruto .....	54
Figura 4.8. Diferentes longitudes de cuerda de burbuja .....	55
Figura 4.9. Impacto de sonda en diferentes zonas de la burbuja .....	55
Figura 4.10. Discretización de la señal temporal completa .....	56
Figura 4.11. Discretización de un trozo de señal temporal .....	57
Figura 4.12. Función de autocorrelación simétrica de señales .....	59
Figura 4.13. Parte positiva de la función de autocorrelación de señales .....	60
Figura 4.14. Autocorrelación de la señal de una sonda de fibra óptica: .....	61
Figura 4.15. Función de autocorrelación de agrupaciones de burbujas .....	62
Figura 4.16. Tiempo que tarda en alcanzar correlación cero la FAC en función de la velocidad de burbuja .....	63
Figura 4.17. Señales pertenecientes a burbujas con la misma velocidad .....	65
Figura 4.18. Función de autocorrelación de señales de Figura 4.17 .....	66
Figura 4.19. Función de autocorrelación de señales de Figura 4.17 .....	67
Figura 4.20. Funciones de autocorrelación y correlación cruzada .....	68
Figura 4.21. Señales correspondientes a una burbuja con velocidad negativa .....	69
Figura 4.22. Correlación cruzada con máximo desplazado a la derecha .....	70
Figura 4.23. Procesado de señales en PV6D de una burbuja con velocidad negativa .....	71
Figura 4.24. Diámetro de burbuja por aproximación .....	71
Figura 5.1. Señales en MATLAB de donde se extraerá la información automáticamente .....	75
Figura 5.2. Señales en PV6D de donde se extraerá la información manualmente .....	76
Figura 5.3. Tamaños de burbuja .....	79
Figura 5.4. Velocidades de burbuja .....	79
Figura 5.5. Velocidad vs Diámetro de burbuja .....	80

# Índice de tablas

Tabla 3.1. Investigaciones experimentales más importantes sobre resaltos hidráulicos .....	32
Tabla 4.1. Valores de las medias de cada señal en cada medición .....	58
Tabla 4.2. Datos que cumplen los criterios de validación .....	64
Tabla 5.1. Resultados obtenidos para un intervalo de tiempo donde hay burbuja.....	75
Tabla 5.2. Medida no válida por la baja correlación entre señales .....	77
Tabla 5.3. Medida no válida por la alta relación de diámetros .....	78



# Capítulo:

## 1 Introducción

### 1.1 Flujos multifásicos y el resalto hidráulico

Los flujos multifásicos se encuentran por todos lados a nuestro alrededor. Según Andrea Prosperetti y Gretar Tryggvason [1], *“se estima que cerca de la mitad de lo que se produce en la sociedad industrial moderna depende en cierta medida de un proceso de flujo multifásico”*. Por flujo multifásico, entendemos la mezcla de al menos dos fases entre líquido, gas y sólido.

En el ambiente, la mezcla de aire, agua y partículas sólidas (sedimentos) se encuentra particularmente en ingeniería de costas e hidráulica. Por ejemplo, como se puede ver en la Figura 1.1, cuando rompe una ola en la playa debido a una modificación progresiva o abrupta de la pendiente del fondo, el aire queda atrapado y los sedimentos también pueden ser arrastrados en la columna de agua conduciendo a una mezcla compleja. La zona blanca de la ola se explica por la gran cantidad de aire atrapado en la rotura. Las zonas turbulentas que también se aprecian claramente en la superficie libre, aumentan la erosión de las playas.



Figura 1.1. Entrada de aire en rotura de oleaje

En ingeniería química, los flujos multifásicos están involucrados en procesos de floculación con aplicaciones para tratamiento de aguas. El estudio del mezclado químico es también de interés primordial en relación a la eficiencia del reactor y a los procesos de difusión. El transporte de contaminación y dispersión en las corrientes de los ríos son también algunos de los problemas ambientales que están vinculados a los flujos multifásicos. En ingeniería de automoción, la mezcla de aire y combustible (motor de combustión interna) es también de gran importancia por temas ecológicos, para mejorar la potencia del motor y reducir la contaminación. Una espuma es una sustancia que está formada por burbujas de gas atrapadas en un líquido. Su baja densidad las hace especialmente adecuadas para el aislamiento térmico, para dispositivos de flotación o materiales de embalaje. También pueden ser utilizadas como un retardante del fuego cuando son líquidas. Los flujos multifásicos están también presentes en la formación de nubes y lluvia o en flujos por tuberías.

Estos ejemplos demuestran nuestra necesidad de mejorar el conocimiento sobre el tema. Además, estos flujos presentan una amplia gama de escalas espaciales y temporales desde el mundo milimétrico (espumas) hasta el geofísico (ciclones y tormentas) que requieren varias técnicas experimentales, desde el tubo de Pitot hasta los sensores ópticos.

En este proyecto, nuestro interés está centrado en un flujo clásico de dos fases, el resalto hidráulico. Cuando se produce una transición de un flujo supercrítico (aguas poco profundas, de alta velocidad) a un movimiento subcrítico (flujo profundo, de baja velocidad), se produce el resalto hidráulico.



La Figura 1.2 presenta el esquema típico de un resalto hidráulico. La Figura 1.3 muestra un resalto hidráulico durante un experimento de laboratorio, mientras que en la Figura 1.4 se observa un resalto hidráulico en la naturaleza.

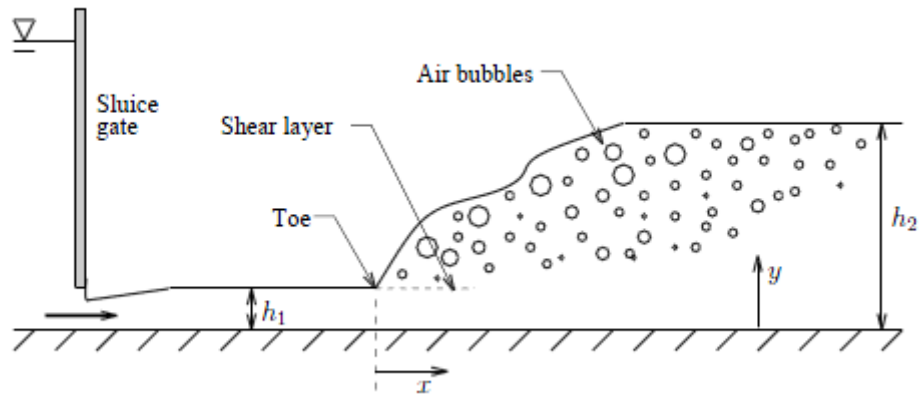


Figura 1.2. Esquema de un resalto hidráulico

En la mayoría de los experimentos de laboratorio, el resalto hidráulico se forma a una pequeña distancia, aguas abajo de la compuerta ( $x_1 < 0,5$  m, Figura 1.2) y a una distancia lejana, aguas arriba de una presa situada al final del canal. Un buen control del caudal, la altura de la presa y la apertura por debajo de la compuerta garantizan la estabilidad de la punta (oscilaciones horizontales limitadas, bajo número de Strouhal) y regulan el régimen del flujo. Deben transcurrir generalmente varios minutos antes de tomar ninguna medida, para asegurar buenas condiciones y evitar efectos inesperados. Las medidas experimentales a veces pueden diferir.

Además, se puede colocar un obstáculo en la parte inferior del canal en lugar de una compuerta. La sección del flujo se reduce y el resalto hidráulico aparece a una pequeña distancia aguas abajo de la parte superior del obstáculo.

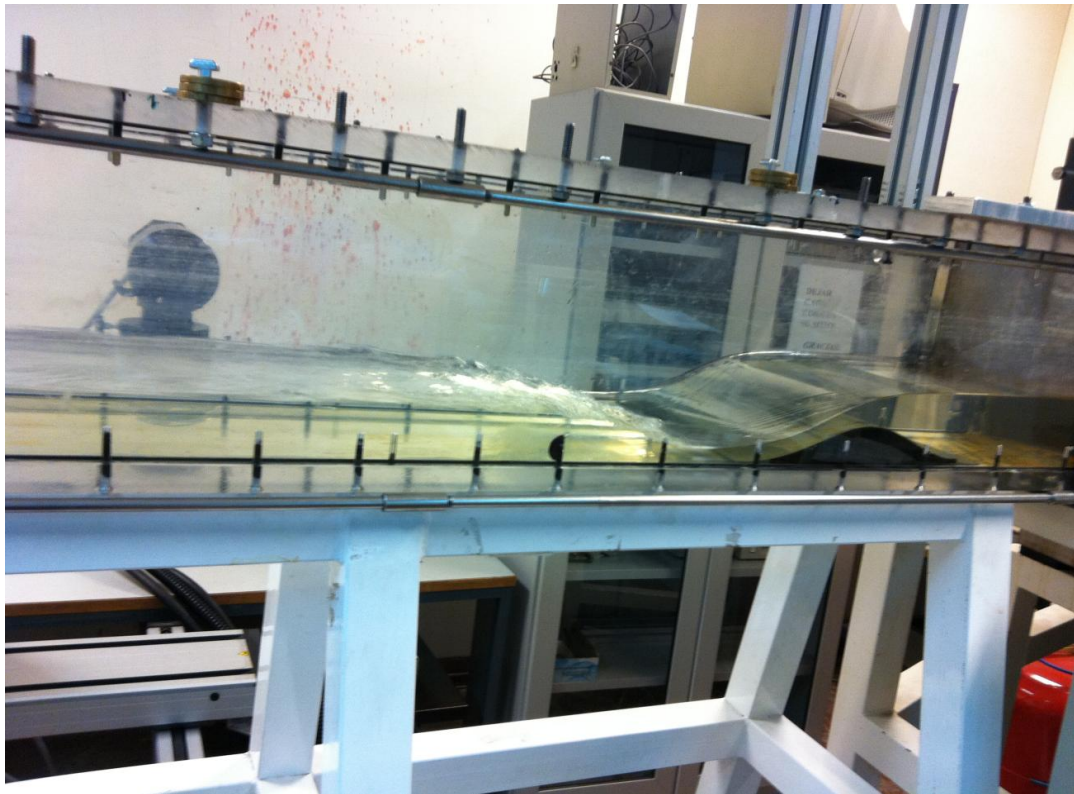


Figura 1.3. Resalto hidráulico en los experimentos de la Universidad Carlos III de Madrid (Escuela Politécnica Superior), flujo de izquierda a derecha



Figura 1.4. Resaltos hidráulicos en corrientes naturales, Québec (Canada)

El resalto hidráulico se caracteriza por ser un flujo altamente turbulento con una capa de cortadura de aire-agua y un área de recirculación (Figura 1.2). Se desarrollan macro vórtices en el interior que interaccionan con la superficie libre produciéndose salpicaduras y formación de gotas de agua en la región del flujo bifásico.

Más allá de la región donde se produce la turbulencia (aguas abajo del punto de choque), se produce una gran disipación de energía cinética. En términos medioambientales, esta propiedad se utiliza por ejemplo con estructuras de bajo impacto para la restauración de ríos y para minimizar los daños por inundaciones.

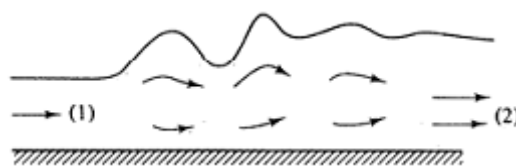
El parámetro principal que caracteriza el resalto hidráulico es el número de Froude, que se define como:

$$Fr = \frac{U_1}{\sqrt{gd_1}}$$

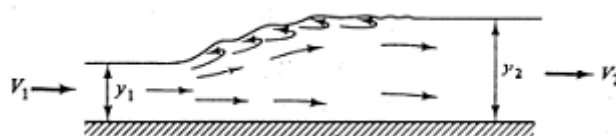
donde  $U_1$  es la velocidad de entrada (m/s),  $d_1$  es la profundidad del agua de entrada (m) y  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

El número de Froude es siempre mayor que 1 en los resaltos hidráulicos. Existen diferentes tipos de resaltos hidráulicos dependiendo de este número adimensional:

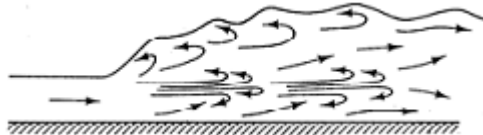
- **Para  $F_1 = 1$  a  $1,7$** , la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto ondulante*.



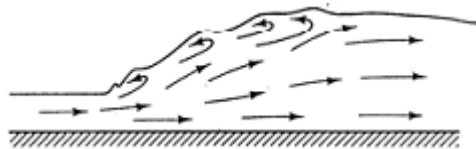
- **Para  $F_1 = 1,7$  a  $2,5$** , se desarrollan una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el *resalto débil*.



- **Para  $F_1 = 2,5$  a  $4,5$ ,** existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a lo largo de varias millas causando daños ilimitados a bancas en tierra y a enrocados de protección. Se produce entonces el *resalto oscilante*.



- **Para  $F_1 = 4,5$  a  $9$ ,** la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%. Se presenta entonces el *resalto permanente o estable*.



- **Para  $F_1 = 9$  y mayores,** el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce entonces el *resalto fuerte*.



El estudio de Gualtieri y Chanson [2] mostró que las propiedades del flujo de aire-agua eran similares, tanto en el flujo estable como en el resalto fuerte.

En un canal rectangular horizontal, despreciando el límite de rozamiento, la ecuación de la continuidad conduce a la ecuación de Bélanger:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)$$

donde  $d_1$  es la profundidad del agua de entrada (m) en el punto de choque y  $d_2$  es la profundidad del flujo aguas abajo (m) lejos del punto de choque.

El resalto hidráulico se utiliza principalmente como disipador de energía. Cuanto más fuerte es el resalto, mayor disipación de energía se produce. La pérdida de carga adimensional está dada por:

$$\frac{\Delta H}{d_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 3)^3}{16(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)}$$

Para un resalto hidráulico estable, la disipación de energía está comprendida entre un 45% y un 70%. Alcanza más de un 85% para resaltos altamente turbulentos. Aunque los resaltos hidráulicos disipan una gran parte de la energía del flujo de entrada, los altos niveles de turbulencia en estos flujos tienden a aumentar la socavación y la erosión en los pilares de los puentes o en los ríos (Figuras 1.5 y 1.6).

Para realizar el modelado físico y análisis de semejanza, se utiliza a menudo el número de Reynolds,  $Re$  así como para caracterizar el flujo:

$$Re = \frac{U_1 d_1}{\nu}$$

En la parte inferior de la Figura 1.5, se ve claramente la intensidad de la corriente. Aquí, la formación del resalto hidráulico está causada por el cambio repentino y brusco en el perfil de la carretera. Se aprecia el color marrón del agua, que transporta partículas sólidas.





Figura 1.5. Gran inundación del río Todd en Alice Springs (NT, Australia)

En la Figura 1.6, el flujo supercrítico (parte superior de la imagen) se convierte en subcrítico (parte inferior). En el fondo del aliviadero se produce una transición que da lugar a un flujo cortante turbulento con macro-vórtices que dan lugar a grandes y rápidas fluctuaciones de la superficie libre y a un fuerte mezclado, que aumentan la disipación de energía.



Figura 1.6. Resalto hidráulico amortiguando la cuenca y el vertedero de una presa



Después de fuertes lluvias, el caudal de algunos ríos aumenta mucho. Especialmente en zonas de montaña, los lechos de los ríos son de gravilla con fuertes y repentinas variaciones de profundidad. Por ello, los resaltos hidráulicos proporcionan espacios muy apreciados por piragüistas y surfistas.



Figura 1.7. Piragüismo en un kayak, Colligan



Figura 1.8. Surfista y ola rompiendo, Plage du Minou

En la Figura 1.8, se ilustra una vez más el gran interés de los investigadores e ingenieros por el resalto hidráulico: debe ser considerado como una ola rompiendo estable.

La amplia gama de situaciones en las que el resalto hidráulico tiene lugar ha reforzado nuestra necesidad de explorar este interesante flujo bifásico. La mezcla de aire/agua, la dinámica de las burbujas, el transporte de sedimentos, la erosión y socavación, la coalescencia de burbujas y los procesos de ruptura de olas se encuentran entre los temas de investigación que pueden ser estudiados a través de los resaltos hidráulicos.

## **1.2 Modelado físico del resalto hidráulico**

Los resaltos hidráulicos se encuentran con frecuencia en corrientes naturales. Este complejo flujo bifásico requiere constantemente más y más investigaciones. A pesar de los numerosos estudios que se han llevado a cabo durante las últimas décadas, todavía existe una falta de conocimiento sobre los mecanismos físicos que intervienen en los procesos de difusión, turbulencia y mezcla que se producen en dichos flujos. Por lo tanto, el desarrollo de códigos numéricos, métodos analíticos y trabajos experimentales son fundamentales para mejorar nuestro conocimiento sobre la dinámica del flujo. Sin embargo, los estudios analíticos y numéricos de flujos multifásicos son bastante difíciles debido a la gran cantidad de ecuaciones relevantes a resolver. Además, tienen lugar muchas interacciones entre burbujas, gotas, partículas, superficie libre, turbulencia que hace que los métodos analíticos sean algo limitados. Esta complejidad hace que a menudo se realicen simplificaciones (promedio de ecuaciones, hipótesis básicas) para el modelado numérico que no puede entonces ser completamente satisfactorio.

Las investigaciones experimentales son por tanto necesarias para ayudar a los modeladores numéricos a calibrar sus códigos con datos empíricos. Ésta es la gran interacción entre los estudios numéricos y experimentales que llevará a los investigadores a una mejor comprensión de los mecanismos físicos involucrados en estos flujos. Las investigaciones experimentales son numerosas y una gran cantidad de datos están disponibles en la literatura acerca de las propiedades de los flujos bifásicos (fracción de vacío, frecuencia de burbuja, velocidad de burbuja, etc.). Éstas fueron obtenidas principalmente utilizando sondas de detección de fase (sonda de fibra óptica o sondas de conductividad). La exactitud de estas mediciones, los resultados y su significado para flujos naturales, no sólo están vinculados a los parámetros de adquisición de datos, sino también a las condiciones experimentales (semejanza).



La interpretación de los datos (extrapolación) para corrientes naturales, requiere de algún criterio de similitud que debe lograrse (similitud geométrica, cinemática o dinámica). Generalmente, los experimentos de laboratorio de flujos bifásicos se basan en una similitud geométrica. Esto significa que las escalas de los modelos y los prototipos son geoméricamente similares. La similitud dinámica también se utiliza a veces.

En mecánica de fluidos, las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los flujos se conocen como las ecuaciones de Navier-Stokes. En un flujo, en la superficie libre de un canal abierto, el efecto de la gravedad no puede ser descuidado.

Las ecuaciones correspondientes de Navier-Stokes son:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \Delta w\end{aligned}$$

Donde  $(u, v, w)$  son los componentes de la velocidad (m/s),  $\rho$  la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ),  $p$  la presión (Pa),  $g$  la aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ),  $(x, y, z)$  los ejes de coordenadas ( $z$  positiva hacia arriba),  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Hasta la fecha, estas ecuaciones diferenciales no lineales permanecen aún sin resolver. De hecho, los flujos turbulentos se caracterizan por procesos aleatorios que no pueden ser modelados de manera precisa, a menos que se impongan algunas hipótesis restrictivas. Hasta la fecha, sólo se pueden proponer soluciones aproximadas. Esa es una razón que explica por qué las previsiones meteorológicas dejan de tener sentido después de una semana. Esto es debido a los fenómenos aleatorios e impredecibles que pueden producirse entre las previsiones y la realidad.

No es raro pensar que la ecuación de Navier-Stokes permanecerá sin resolver durante mucho tiempo. Esto explica en parte, el limitado número de estudios numéricos sobre el resalto hidráulico comparado con investigaciones experimentales: modelar la turbulencia es difícil, pero modelar la turbulencia en flujos bifásicos es algo casi imposible.

Las ecuaciones anteriores no son adimensionales. Para convertirlas, se introducen las siguientes variables:

$$\begin{array}{lll}
x^+ = \frac{x}{d_1} & u^+ = \frac{u}{U_1} & t^+ = \frac{U_1}{d_1} t \\
y^+ = \frac{y}{d_1} & v^+ = \frac{v}{U_1} & p^+ = \frac{p}{\rho U_1^2} \\
z^+ = \frac{z}{d_1} & w^+ = \frac{w}{U_1} &
\end{array}$$

Introduciéndolas ahora en las ecuaciones del principio, obtenemos nuevas ecuaciones de Navier-Stokes adimensionales:

$$\begin{aligned}
\frac{du^+}{dt^+} &= -\frac{\partial p^+}{\partial x^+} + \frac{1}{Re} \Delta u^+ \\
\frac{dv^+}{dt^+} &= -\frac{\partial p^+}{\partial y^+} + \frac{1}{Re} \Delta v^+ \\
\frac{dw^+}{dt^+} &= -\frac{\partial p^+}{\partial z^+} - \frac{1}{Fr} + \frac{1}{Re} \Delta w^+
\end{aligned}$$

Para asegurar la similitud entre el modelo (laboratorio) y el prototipo (a escala), se tiene que comprobar que las ecuaciones de Navier-Stokes son similares en ambos casos. De hecho, algunas ecuaciones tendrán las mismas soluciones. Para la superficie libre de un flujo en un canal abierto (como el resalto hidráulico), esto se logra cuando los números de Froude y Reynolds del modelo y prototipo sean iguales. Teóricamente, esto significa que la similitud de Reynolds y Froude debe ser alcanzada simultáneamente. Excepto en casos raros, no se pueden alcanzar simultáneamente. Sin embargo, para la superficie libre de un flujo, la condición de Reynolds puede ser eliminada cuando los procesos de difusión se puedan despreciar ( $Re \gg 1$ ).

El análisis dimensional propuesto por Chanson conduce a una conclusión similar. Considerando el resalto hidráulico de un canal horizontal, rectangular se supone que todas las propiedades del flujo ( $C, F, U, d_{mbcl}, \dots$ ) dependen de las propiedades del líquido y la preparación experimental. Eso es:

$$C, F, U, d_{mbcl}, \dots = F_1(x, y, z, d_1, \delta, \nu_{air}, \nu_{water}, \rho_{air}, \rho_{water}, \dots)$$

donde  $C$  es la fracción de vacío,  $F$  la frecuencia de burbuja,  $V$  la velocidad,  $d_{mbcl}$  la longitud media de cuerda de burbuja,  $(x, y, z)$  las coordenadas,  $\nu_{air}$  y  $\nu_{water}$  la viscosidad cinemática del aire y el agua respectivamente,  $\rho_{air}$  y  $\rho_{water}$  la densidad del aire y el agua respectivamente.  $\delta$  es el espesor de la capa límite del flujo de entrada (definiendo unas condiciones del flujo de entrada parcial o completamente desarrollado).

No teniendo en cuenta los efectos de la compresibilidad, se puede despreciar la  $\rho_{air}$  y  $v_{air}$  de tal forma que la ecuación anterior puede expresarse de forma adimensional:

$$C, \frac{Fd_1}{v_1}, \frac{U}{\sqrt{gd_1}}, \frac{d_{mbcl}}{d_1}, \dots = F_2 \left( \frac{x-x_1}{d_1}, \frac{y}{d_1}, \frac{z}{d_1}, \frac{U_1}{\sqrt{gd_1}}, \frac{U_1 d_1}{v}, \dots \right)$$

En la parte derecha de la ecuación, aparecen los números de Froude y Reynolds en cuarta y quinta posición respectivamente. Chanson descubrió que efectos de escala importantes en cuanto a las propiedades de los flujos aire-agua (distribuciones de fracción de vacío, frecuencia de paso y tiempo de cuerda de burbuja) pueden aparecer si sólo se utiliza la similitud de Froude. Por ello, es necesario tener en cuenta también el número de Reynolds. Recientemente, Gualtieri y Chanson analizaron el efecto del número de Froude en la entrada de aire en los resaltos hidráulicos con números de Froude hasta 14,3. Se demostró que las propiedades de aireación se ven reforzadas en los números de Froude más altos.

En las Figuras 1.9 y 1.10 se muestran unos ejemplos de experimentos de laboratorio sobre resaltos hidráulicos, donde se aprecia lo mencionado anteriormente:



Figura 1.9. Resalto hidráulico con flujo de izquierda a derecha. Condiciones del flujo:  
Fr = 1,35, d1 = 90 mm



Figura 1.10. Resalto hidráulico con flujo de izquierda a derecha. Condiciones del flujo:  
 $Fr = 7$ ,  $d_1 = 24 \text{ mm}$

### 1.3 Escalas y estructuras en flujos turbulentos

Desde las famosas observaciones de Leonardo Da Vinci a principios del siglo XVI, la turbulencia se ha descrito como un conjunto de vórtices o remolinos de diferentes tamaños y con una gran diversidad de escalas de tiempo y de velocidad. La turbulencia se genera a grandes escalas (macroescalas), y su energía se alimenta de la energía que se obtiene del flujo medio a través de los procesos de inestabilidad.

Las macroescalas están directamente relacionadas con la geometría y velocidad media del flujo y se expresan en forma de grandes y claramente reconocibles estructuras, como vórtices, conocidas como “estructuras coherentes” cuya presencia es una de las principales características de la turbulencia.

A continuación, en la Figura 1.11 se muestra un ejemplo en el que existen dos zonas de recirculación donde se ven claramente estos vórtices característicos de la turbulencia.

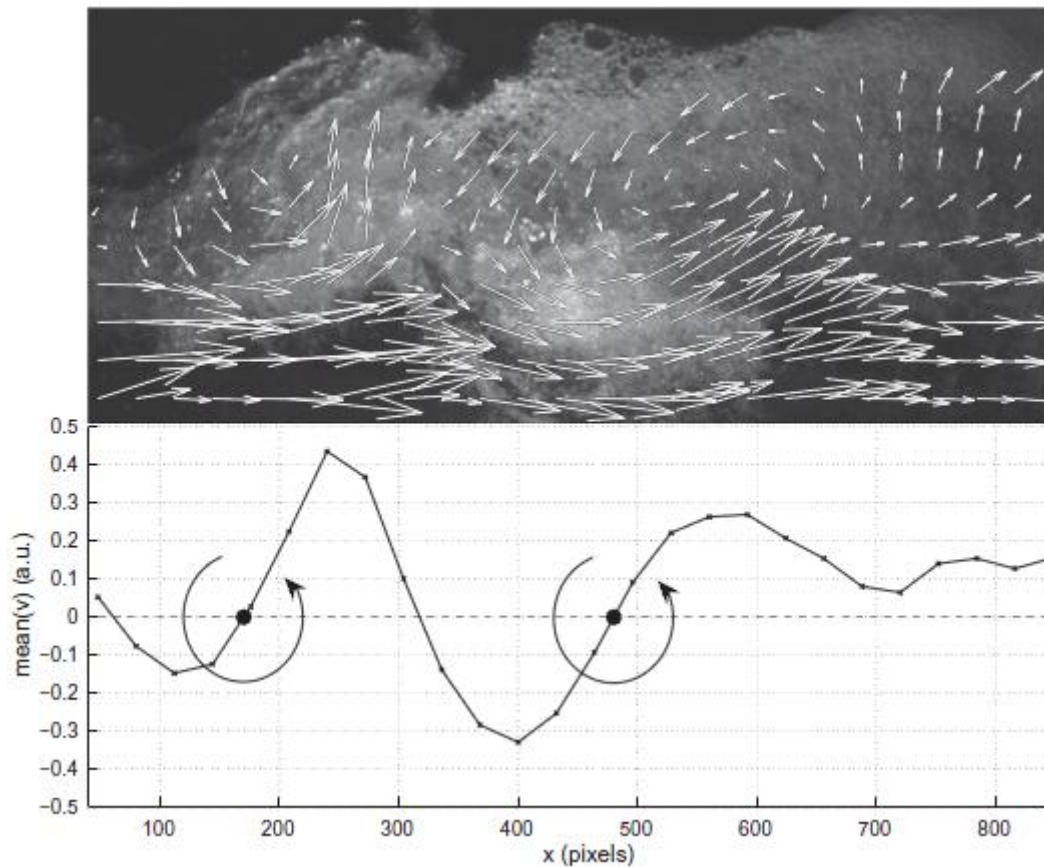


Figura 1.11. Ejemplo de formación de vórtices

En flujos con burbujas, estas estructuras son un factor importante para el transporte de las burbujas. Varios autores han abordado el tema de estructuras coherentes en flujos con burbujas como Sene et al. (1996), Mudde et al. (1997), Van Den Akker (1998).

En un estudio numérico, Spelt (1996) descubrió que en los flujos turbulentos, las burbujas se organizan entre sí formando grandes agrupaciones (como estructuras) que tienen su eje longitudinal en la dirección de la velocidad media del flujo.

En la Figura 1.12, en la fotografía de la derecha se puede apreciar como en la parte inferior del flujo se produce este fenómeno en el que varias burbujas se agrupan en la dirección del flujo de izquierda a derecha.

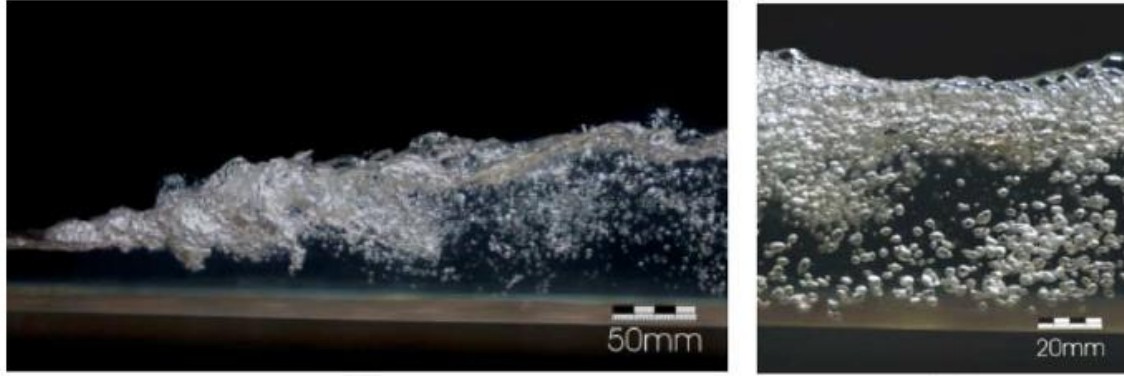


Figura 1.12. Agrupación de burbujas en la dirección del flujo

La disipación de energía por unidad de masa  $\tilde{\epsilon}$  del flujo medio se estima para la turbulencia isotrópica mediante la teoría de Kolmogorov (1941):

$$\tilde{\epsilon} \sim \frac{U^3}{L}$$

Esta ecuación indica que las estructuras más grandes con energía  $U^2$  pierden esa energía durante una escala temporal  $\tau \sim L/U$ . A través de la cascada de energía y el efecto de expansión de los vórtices, la energía cinética turbulenta se transfiere de las escalas grandes a las pequeñas.

Eventualmente, los vórtices son tan pequeños que la viscosidad molecular se vuelve dominante y la energía se disipa en forma de calor. Las escalas más pequeñas, o microescalas de turbulencia se determinan solamente mediante la viscosidad molecular  $\nu_m$  y por la disipación de energía  $\tilde{\epsilon}$ . Mediante análisis dimensional, Kolmogorov obtuvo una escala de longitud y tiempo, y por tanto una escala de velocidad:

$$l_K = \left( \frac{\nu_m^3}{\tilde{\epsilon}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$t_K = \left( \frac{\nu_m}{\tilde{\epsilon}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$u_K = \frac{l_K}{t_K} = (\nu_m \cdot \tilde{\epsilon})^{\frac{1}{4}}$$

Estos parámetros se denominan escala de longitud, de tiempo y de velocidad de Kolmogorov respectivamente. El rango de escalas entre las macroescalas y microescalas se denomina “subrango inercial”. En este posiblemente amplio rango de escalas, la energía turbulenta es transportada solamente mediante los procesos en cascada de las escalas mayores a las menores.

Los valores de velocidad en una posición dada durante dos instantes  $t_1$  y  $t_2$  no son independientes. Como veremos en el capítulo 4, la dependencia de las dos velocidades viene dada por la autocorrelación, que para flujos estacionarios es función de la diferencia temporal  $\tau = t_2 - t_1$ :

$$R(\tau) = \overline{u'(t) \cdot u'(t + \tau)}$$

La función de autocorrelación para un desfase igual a cero es igual a la energía cinética turbulenta:

$$R(0) = \overline{u'^2}$$

En general, la correlación es alta para  $\tau$  pequeños y decrece hasta cero a medida que incrementa el desfase. Para medir las macroescalas del flujo, se considera el máximo intervalo de tiempo durante el cual existe correlación. Esto es a lo que se denomina integral de escala de tiempo  $T_{xx}$  y  $T_{xz}$  que se suele determinar a partir de la función de autocorrelación y de la función de correlación cruzada (Figura 1.13):

$$T_{xx} = \int_{\tau=0}^{\tau=\tau(R_{xx}=0)} R_{xx}(\tau) d\tau$$

$$T_{xz} = \int_{\tau=\tau(R_{xz}=(R_{xz})_{\max})}^{\tau=\tau(R_{xz}=0)} R_{xz}(\tau) d\tau$$

El nivel de turbulencia  $T_u$  se caracteriza por las fluctuaciones de velocidad interfacial del flujo entre los sensores. La ecuación que lo define, se obtiene de la forma que tienen las funciones de autocorrelación  $R_{xx}$  y correlación cruzada  $R_{xz}$ :

$$T_u = 0,851 \cdot \frac{\sqrt{\tau_{0,5}^2 - T_{0,5}^2}}{T}$$



Donde  $\tau_{0,5}$  es el desfase para el cual la función de correlación cruzada normalizada es la mitad de su valor máximo, de manera que:

$$R_{xz}(T + \tau_{0,5}) = \frac{(R_{xz})_{max}}{2}$$

$(R_{xz})_{max}$  es el máximo coeficiente de correlación cruzada para  $\tau = T$

$T_{0,5}$  es el tiempo para el cual la función de autocorrelación normalizada es igual a 0,5 (Figura 1.13).

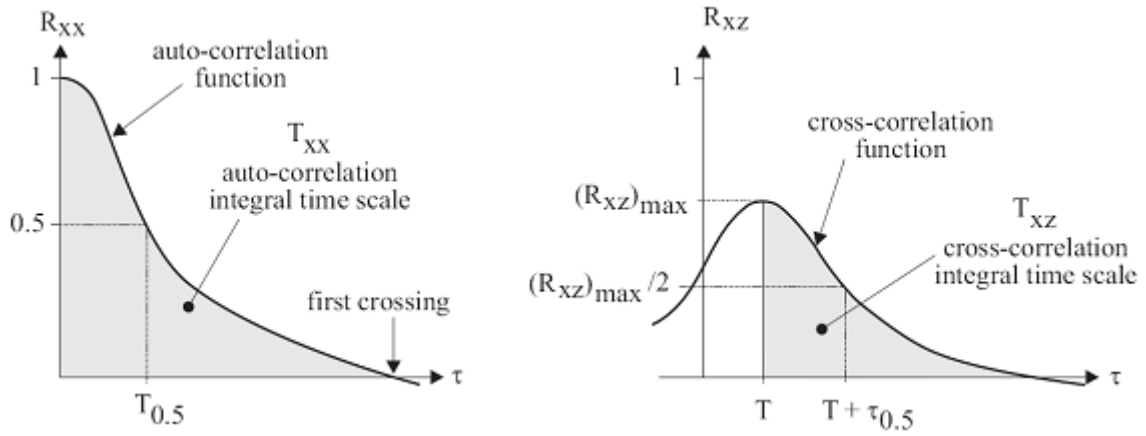


Figura 1.13. Esquemas de la función de autocorrelación y correlación cruzada para una sonda de doble punta





# Capítulo:

## 2 Instalación experimental

### 2.1 Elementos del canal experimental

Este capítulo contiene la descripción de la instalación donde se realizaron los experimentos. Se incluyen los diferentes componentes del sistema de medición, los detalles del canal hidrodinámico y la descripción del flujo a estudiar.

Los experimentos fueron realizados en el canal horizontal y rectangular del laboratorio del área de Mecánica de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid. Como se puede observar en la Figura 2.1, la instalación experimental consiste en un canal de ensayos donde se reproduce el resalto hidráulico para su análisis. Tiene una longitud de 1,5 m aproximadamente, una profundidad de 25 cm y una anchura de 248 mm. Sus paredes están construidas en metacrilato para facilitar la visualización del flujo.

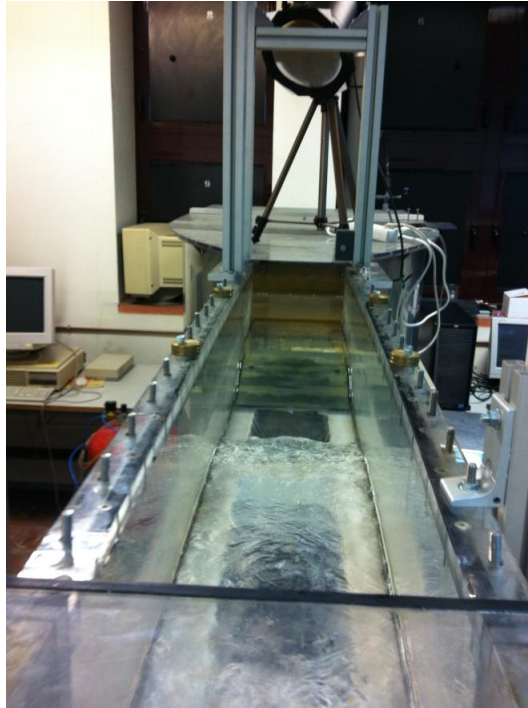


Figura 2.1. Canal hidrodinámico

A continuación se muestra una fotografía de la instalación completa y una breve descripción de cada uno de los componentes del canal hidrodinámico.



Figura 2.2. Instalación experimental

1. **Canal de ensayos:** parte de la instalación donde se reproducen los distintos tipos de flujo que tienen lugar en canales abiertos. En este caso en concreto, donde se produce el resalto hidráulico para su análisis.
2. **Pozo de succión:** situado al final de la zona de ensayos. Su misión es recoger el agua que cae por gravedad, para pasar a los circuitos de retorno.
3. **Equipo de bombeo:** existen dos bombas modelo 50-125/22, situadas al final de las tuberías de retorno que impulsan el agua y permiten regular la velocidad del flujo. Cada una de ellas tiene una potencia de 2,3 kW.
4. **Dispositivos manipuladores de turbulencia:** su misión es disminuir en todo lo posible la intensidad turbulenta del flujo ocasionada por las bombas, así como las fluctuaciones originadas. En primer lugar hay un plato perforado para otorgar al flujo mayor uniformidad. A continuación hay un panel de abeja que elimina las componentes de velocidad no deseadas. Por último existe una malla para eliminar la turbulencia remanente.
5. **Cámara de remanso:** su función principal es amortiguar el flujo que procede del equipo de bombeo, tras haber pasado por las celdas y mallas, para que llegue en las mejores condiciones a la zona de estrechamiento.
6. **Contracción:** situada justo antes de la entrada a la zona de ensayos (Figura 2.3). Entre sus funciones están reducir el nivel de turbulencia del flujo y las pérdidas de presión de los elementos anteriores, haciendo que el flujo llegue a la entrada del canal lo más uniforme posible. Ha sido construida en acero inoxidable.

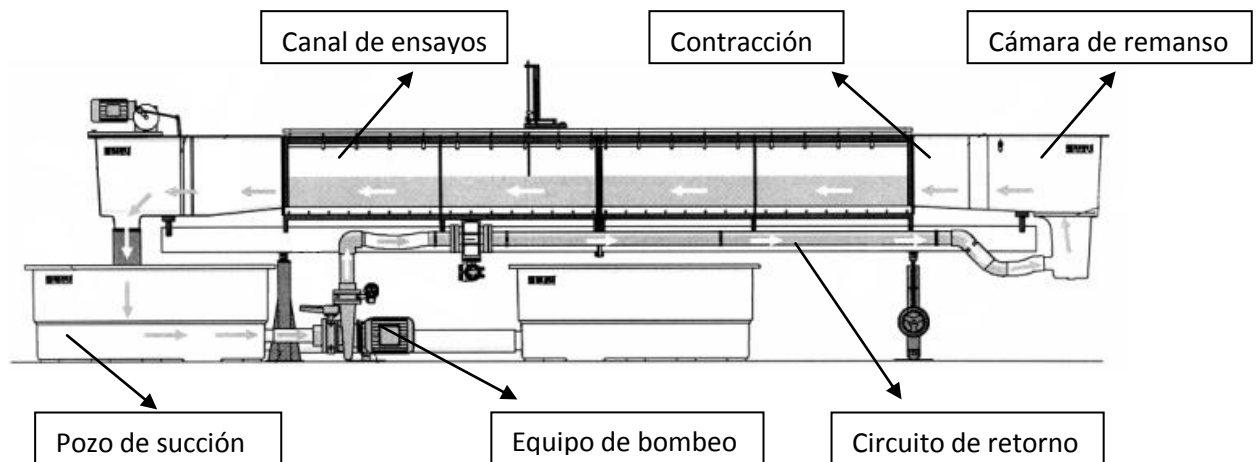


Figura 2.3. Esquema de la instalación

Las dos bombas se accionan por medio de una caja de control (Figura 2.4 izquierda) y la velocidad del flujo se puede regular desde la otra caja de control (Figura 2.4 derecha) situada junto a la contracción y el canal de ensayos en el exterior. En realidad, lo que se selecciona es frecuencia de la bomba y no velocidad del flujo. Durante los ensayos realizados se ha seleccionado siempre una frecuencia muy similar, incluso la misma para ambas bombas.



Figura 2.4. Cajas de control de accionamiento de las bombas

## 2.2 Método empleado para la formación del resalto

Para provocar el resalto hidráulico se ha colocado un obstáculo en el canal de ensayos con forma de arco de circunferencia en el centro y forma hiperbólica en los extremos (Figura 2.5), construido de tal forma que el radio de la circunferencia y la curvatura de las hipérbolas fueran iguales.

En cuanto a las dimensiones del obstáculo, tiene una longitud de 30 cm y una altura máxima en su centro de 4 cm. El ancho es de 245 mm teniendo a cada lado una superficie de espuma de 2 mm de ancho para que se ajuste de forma precisa en el canal. Mediante este obstáculo se consigue que el flujo pase de régimen subcrítico a régimen supercrítico, teniendo lugar posteriormente un resalto hidráulico. El objetivo es que no se produzca desprendimiento de corriente al hacer pasar el flujo por el obstáculo,

además que el flujo sea uniforme aguas abajo. Para ello, después de poner en marcha la instalación se requiere que transcurran unos minutos antes de realizar ninguna medición.



Figura 2.5. Detalle del obstáculo que provoca el resalto

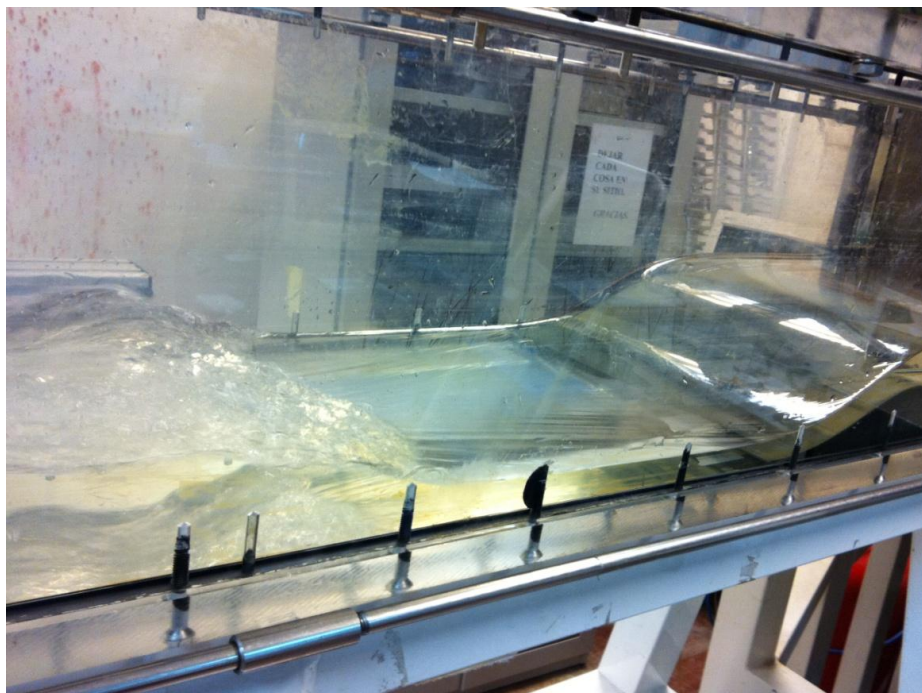


Figura 2.6. Formación del flujo supercrítico antes del resalto hidráulico



## 2.3 Elementos de adquisición de datos

Una vez definidos los elementos que componen el canal experimental, a continuación se exponen los equipos e instrumentación que se han utilizado para la adquisición de datos. Los componentes principales del sistema de adquisición de datos son los siguientes:

- PC con tarjeta de adquisición de datos
- Módulo opto-electrónico
- Sonda óptica de doble punta

A continuación, un esquema donde se muestra la manera en que deben estar conectados dicho elementos y más adelante se dará una breve descripción de cada uno de ellos.

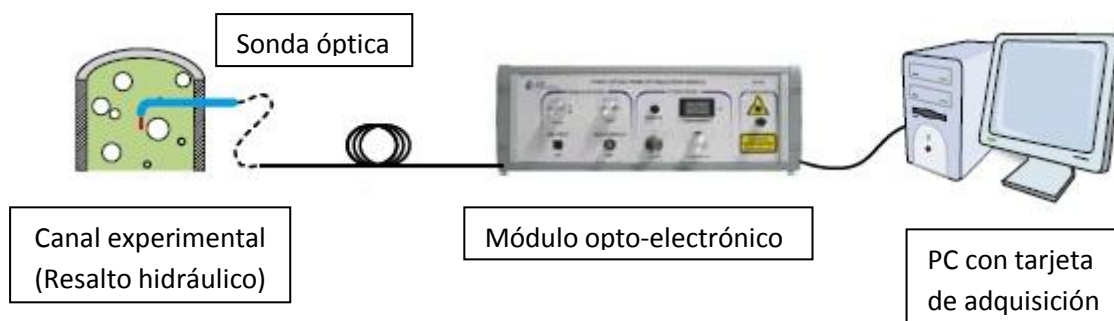


Figura 2.7. Esquema de la instrumentación

### 2.3.1 Sonda óptica

Las medidas se llevaron a cabo mediante una sonda óptica de doble punta sumergida parcialmente en el resalto hidráulico (Figura 2.8). Para una correcta distinción entre las fases es crucial que el contacto entre la sonda y cada fase sea bueno. En el caso del flujo bifásico burbujeante, el cuello de botella es el contacto sonda-burbuja debido a los efectos de tensión superficial. Un mal contacto entre las burbujas y la punta de la sonda, obviamente conduce a una mala calidad de la señal.

Por ello, es muy importante elegir bien la forma y tamaño de la punta de la sonda con relación al tamaño de burbuja.

Con el fin de realizar medidas con precisión, la punta de la sonda debe ser lo más pequeña posible (siempre menor al diámetro de las burbujas, lo cual se cumple como veremos). En cuanto a la forma, se ha utilizado una punta de corte plano que proporciona excelentes resultados.

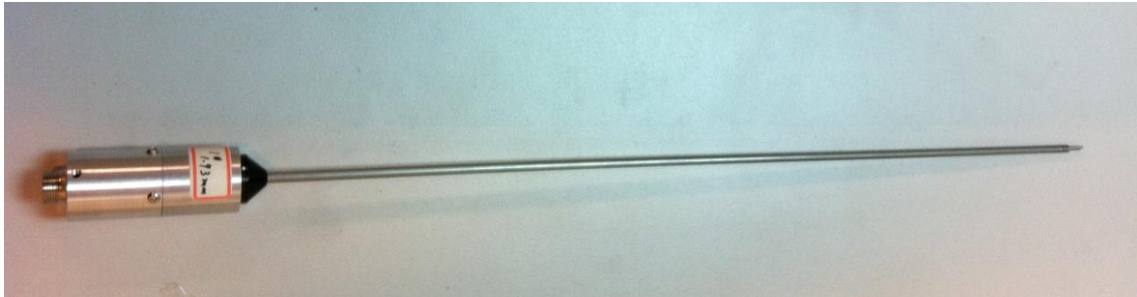


Figura 2.8. Sonda óptica de doble punta

Este equipo de medición utiliza la técnica descrita por Cartellier y Achard (que se detallará en el siguiente capítulo), para señalar la presencia de aire o agua en los extremos de cada una de las dos fibras ópticas, separadas 1,93 mm entre sí (Figura 2.9).



Figura 2.9. Detalles sonda óptica



### 2.3.2 Módulo opto-electrónico

La sonda óptica conduce la luz emitida por un módulo opto-electrónico (Figura 2.10), a través de las dos fibras ópticas. La punta, que es la parte sensible de la sonda, tiene un radio que garantiza una eficiente penetración de la sonda en la superficie de la burbuja. El módulo opto-electrónico, que proporciona luz a las fibras ópticas, también detecta y convierte la luz reflejada en una señal analógica y la amplifica. Esta señal analógica también puede convertirse por la unidad en una señal 0V - 5V (0V: presencia de líquido, 5V: presencia de gas en la punta de la sonda) utilizando una técnica de doble umbral.

El tiempo de respuesta de la electrónica del módulo opto-electrónico es de alrededor de 1  $\mu$ s, que permite seguir los rápidos cambios de la señal correspondientes a las transiciones de una fase a otra.



Figura 2.10. Módulo opto-electrónico

### 2.3.3 PC con tarjeta de adquisición

La salida del módulo opto-electrónico está conectada a una tarjeta de adquisición que posee alrededor de 1MHz de frecuencia de adquisición y que opera desde un PC que almacena los instantes de tiempo correspondientes a cambios de fase (agua-aire, aire-agua) en la punta de la sonda.



# Capítulo:

## **3 Determinación de las características de las burbujas mediante sondas ópticas**

### **3.1 Reseña histórica de técnicas de medición**

En los últimos 50 años se han llevado a cabo numerosos estudios mediante modelización numérica, analítica y experimental requiriéndose una gran cantidad de instrumentación. La Tabla 3.1 resume los principales estudios experimentales que se han realizado sobre resaltos hidráulicos en los últimos 50 años. Aunque se han producido algunos avances, las aproximaciones numéricas y analíticas no son aún lo suficientemente precisas como para dar soluciones exactas. La complejidad del flujo y la enorme cantidad de ecuaciones a resolver, hacen que sea demasiado difícil la resolución de dichos cálculos.

<b>Referencias</b>	<b>Fr</b>	<b>Re</b>	<b>Técnicas de medición</b>	<b>Comentarios</b>
Rajaratnam 1962	2,68 - 8,72	34.000 - 110.500	Sondas de conductividad	
Rajaratnam 1965	2,68 - 9,78	52.500 - 128.000	Tubo estático de Pitot	3 mm diámetro externo, cabeza hemisférica
Resch y Leutheusser 1972	2,98 - 8,04	33.360 - 71.760	Sonda cónica de hilo caliente	Tamaño de sensor 0,6 mm. Condiciones del flujo de entrada parcial y completamente desarrollado.
Babb y Aus 1981	6	122.850	Sonda cónica de hilo caliente	Tamaño de sensor 0,4 mm. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Chanson 1995	5,1 - 8,6	39.500 - 63.800	Tubo Pitot + Sonda de conductividad de una o dos puntas	Tubo Pitot: 3,3 mm diámetro externo. Sonda de conductividad de una punta (0,35 mm electrodo interior) Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Mossa y Tolve 1998	6,42 - 7,3	57.300 - 58.000	Cámara de vídeo CCD	CCD 200.000 píxeles. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Chanson y Brattberg 2000	6,33 - 8,48	36.120 - 48.580	Tubo Pitot + Sonda de conductividad de doble punta	Doble punta: 25 $\mu$ m electrodo interior. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Waniewski et al 2001	11,5 - 19,3	10.940 - 16.680	Anemómetro de fase Doppler	Resolución: 1 $\mu$ m
Liu et al 2004	2 - 3,32	86.100 - 147.680	Velocímetro acústico Doppler	1mm diámetro, punta cónica de zafiro
Murzyn et al 2005, 2007	2 - 4,8	45.990 - 88.500	Sondas de fibra óptica (una y dos puntas). Medidores de alambre	Tamaño de sensor 0,01 mm, 1mm separación entre puntas. Frecuencia de muestreo hasta 1 MHz. Dos finos alambres separados 1 mm. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Lennon y Hill 2006	1,4 - 3	23.930 - 27.940	Cámara de Velocimetría por Imágenes de Partículas	
Chanson 2006	5 - 8,1	31.500 - 51.000	Sondas de conductividad de una sola punta. Tubo Pitot (3,3 mm diámetro externo)	Electrodo interior: 0,35 mm de diámetro. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.

Chanson 2007	4,60 – 8,60	25.000 - 98.000	Sondas de conductividad de una sola punta	Electrodo interior: 0,35 mm de diámetro. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Gualtieri y Chanson 2008	5,2 - 14,3	24.680 - 58.000	Sondas de conductividad de una sola punta	Electrodo interior: 0,35 mm de diámetro. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Murzyn y Chanson 2007, 2008	5,1 - 8,3	38.550 - 64.100	Sondas de conductividad de doble punta	Electrodo interior: 0,25 mm, 7 mm separación entre puntas. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.

Tabla 3.1. Investigaciones experimentales más importantes sobre resaltos hidráulicos

La primera aportación experimental significativa la realizó Rajaratnam [3]. En 1965, dio una descripción de los campos de velocidad en los saltos hidráulicos utilizando un tubo Pitot-Prandtl. Mostró la analogía entre el flujo de un chorro de pared y un salto hidráulico no aireado. De hecho, observó el desarrollo de una capa límite cerca del fondo, caracterizada por un rápido aumento de la velocidad sobre una delgada capa sobre el fondo del canal (Figura 3.1). Después, se midió un descenso gradual. Estos resultados siguieron un primer estudio extenso realizado por Rajaratnam en 1962, donde se utilizaron sondas de conductividad para dar resultados básicos sobre las propiedades de los flujos burbujeantes, como la fracción de vacío.

Diez años más tarde, Resch y Leutheusser [4] hicieron una de las contribuciones más importantes hasta la fecha en el tema. Sus resultados fueron obtenidos mediante sondas cónicas de película caliente en la región burbujeante del flujo. Resch y Leutheusser mostraron principalmente que los procesos de entrada de aire, velocidad de transferencia y energía de disipación eran fuertemente afectados por las condiciones del flujo de entrada. Éste es un punto fundamental y significa que la calidad de los resultados depende de las condiciones experimentales. Como consecuencia, el espesor relativo de la capa límite ( $\delta/d_1$ ) que se forma aguas arriba del punto de impacto es la clave que afecta al flujo burbujeante (Figura 3.1). Dependiendo del espesor relativo de esta capa límite, las condiciones del flujo de entrada son parcialmente desarrolladas (PD) o completamente desarrolladas (FD) (Tabla 1). Murzyn F., Mouazé D. y Chaplin J.R [5] dieron una estimación del espesor de la capa límite que se forma en una superficie plana de PVC. Obtuvieron un valor de  $0,18d_1 < \delta < 0,36d_1$  que se corresponde con unas condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrolladas (PD).

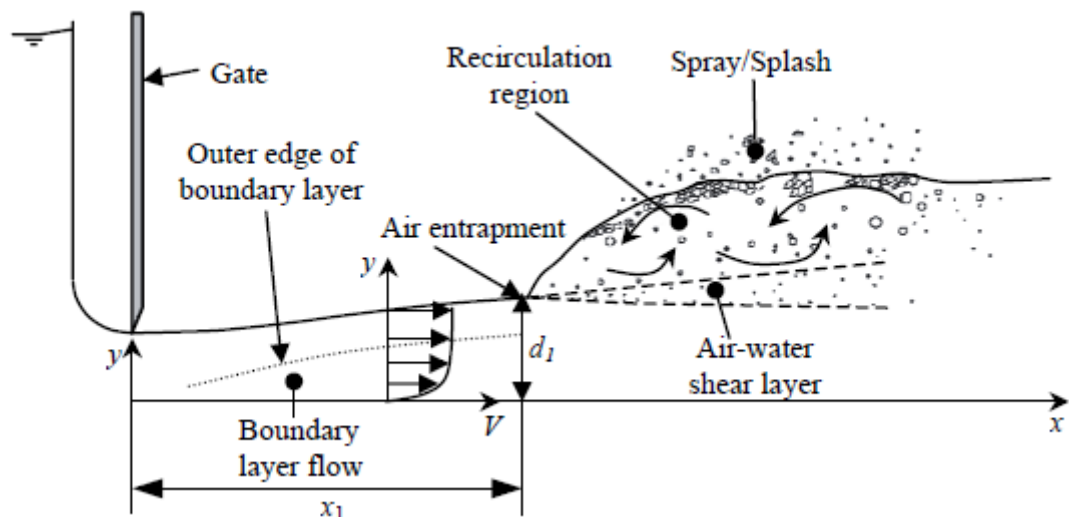


Figura 3.1. Formación de la capa límite en un resalto hidráulico

En 1981, Babb y Aus [6] utilizaron sondas cónicas de película caliente de tamaños más pequeños que las de Resch y Leutheusser (algo bastante interesante ya que las sondas intrusivas pueden alterar el flujo). En los saltos hidráulicos, en la parte superior del flujo donde hay velocidades horizontales negativas, esto es particularmente cierto. Por lo tanto, las sondas intrusivas deben ser lo más pequeñas posibles para minimizar dichas perturbaciones y optimizar la precisión de los resultados. Babb y Aus investigaron el movimiento de las burbujas de aire dentro y fuera del salto para unas condiciones experimentales de  $Fr = 6$ . Vieron que las grandes burbujas estaban situadas mayormente cerca del punto de choque. Su vida era muy corta debido a la turbulencia, cortadura y flotabilidad.

En los últimos años, la mejora de estas técnicas experimentales en términos de tiempos de respuesta, resolución espacial y temporal o procedimientos de análisis de datos ha dado lugar a un extraordinario número de estudios con sondas de conductividad u ópticas, medidores de alambre o visualización de flujos.

A principios de los 90, Chanson et al. [7] utilizaron preferentemente sondas de conductividad (de una y dos puntas) fabricadas, probadas y usadas en la Universidad de Queensland con un rango de tamaños desde 0,025 mm hasta 0,35 mm. Estas sondas de detección de fase están diseñadas para atravesar las burbujas. Basadas en la diferencia de resistividad eléctrica entre el aire y el agua, se adaptan muy bien en flujos con burbujas como los resaltos hidráulicos. En la Figura 3.2 se muestra un esquema de este tipo de sonda de una punta.

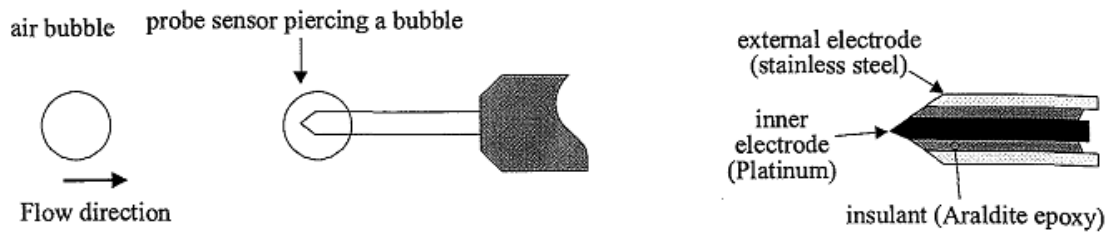


Figura 3.2. Esquema de una sonda de conductividad de una punta

Cuando la parte sensible de la sonda está en el agua, la corriente fluye entre la punta y el metal de soporte y se obtiene un valor de voltaje de salida. Se hace prácticamente nulo cuando la sonda está en aire. Debido a que el voltaje de salida está sujeto a algunas fluctuaciones causadas por el polvo que fluye en el agua, se utiliza una única técnica de umbral sobre la señal de salida para definir los desfases correspondientes al aire y al agua.

El análisis de los datos del voltaje de salida, proporciona información básica del flujo burbujeante como la fracción de vacío ( $C$ ), la frecuencia de paso ( $F$ ) y el tamaño de burbuja ( $d_{mbcl}$ ).

La principal ventaja de estos sensores intrusivos es su tamaño (0,35 mm o 0,25 mm). Por tanto, son bastante precisos para detectar burbujas muy pequeñas (menores al tamaño del sensor). Su tiempo de respuesta dinámico es alto (menos de 10  $\mu$ s), por lo que son precisos y adecuados para mediciones en flujos altamente turbulentos y fluctuantes como los resaltos hidráulicos.

Chanson [8] fue el primero en describir los procesos de mezcla de aire-agua proporcionando información pertinente sobre la fracción de vacío, frecuencia de paso, tamaño y velocidad de las burbujas aguas abajo del punto de choque. Sus conclusiones principales fueron:

- **La Fracción de Vacío ( $C$ ):** es la proporción de tiempo que la punta de la sonda se encuentra en el aire. En la capa de cortadura turbulenta,  $C$  cumple con una ecuación de difusión. Por tanto, los perfiles verticales de  $C$  siguen una distribución gaussiana dada por:

$$C = C_{\max} \exp \left( - \frac{\left( \frac{y - y_{C_{\max}}}{d_1} \right)^2}{4D^* \left( \frac{x - x_1}{d_1} \right)} \right)$$

- **La Frecuencia de Paso (F):** es el número de burbujas que impactan la punta de la sonda por segundo. En la región burbujeante del flujo, los perfiles verticales de F muestran dos picos particulares (Figura 3.3). El pico principal se encuentra en la capa de cortadura turbulenta, mientras que el pico más pequeño se encuentra principalmente en la capa de mezcla.
- **Las posiciones verticales del máximo de la Fracción de Vacío ( $y_{C_{max}}/d_1$ ) y de la Frecuencia de Paso ( $y_{F_{max}}/d_1$ ):** no coinciden dándose dos procesos de difusión diferentes.
- **La importancia de los Efectos de Escala:** la semejanza dinámica (similitud de Froude) es importante y algunos efectos de escala pueden aparecer para números de Reynolds elevados ( $Re > 10^5$ ).

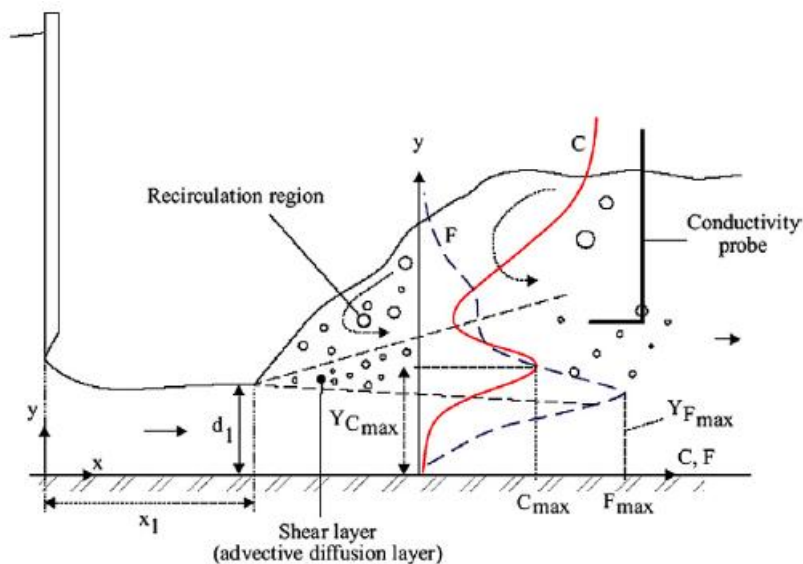


Figura 3.3. Perfiles verticales de C y F dentro del resalto hidráulico

Cuando se utiliza una sonda de conductividad de doble punta (Figura 3.4), se puede obtener información adicional como la velocidad de la burbuja ( $U$ ), niveles de turbulencia ( $T_u$ ), que corresponden a las fluctuaciones de velocidad en la interfase aire-agua, y escalas de tiempo ( $T_{xx}$ ) y de longitud ( $L_{xx}$ ,  $L_{xz}$ ) de turbulencia que representan las estructuras turbulentas del flujo.



Las escalas de tiempo y de longitud de turbulencia traen nueva información de los mecanismos físicos que se producen en dichos flujos, que pueden ser útiles para ajustar los modelos numéricos (tamaño de malla, resoluciones espaciales y temporales,...).



Figura 3.4. Sonda de conductividad de doble punta

En 2005, Murzyn et al. [5] publicaron los resultados obtenidos en resaltos hidráulicos con sondas de fibra óptica. Ésta es una técnica intrusiva en la que las puntas están también diseñadas para penetrar en las burbujas. La diferencia con las sondas de conductividad es que, en este caso, la detección de fase (aire o agua) está basada en la diferencia del índice de refracción entre ambos medios. Ésta es una técnica robusta y de gran precisión ya que la punta del sensor tiene un tamaño de sólo 0,01 mm (Figura 3.5). Por lo tanto, las burbujas de tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$  pueden ser detectadas. Además, el tiempo de respuesta de este tipo de sonda es menor a 1  $\mu\text{s}$ , haciendo que sea adecuada para analizar flujos bifásicos altamente turbulentos y rápidamente cambiantes. Sus resultados mostraron que los datos eran consistentes hasta  $C = 0,001$  o más, sin duda mejor que con sondas de conductividad. En la capa de mezcla, también encontraron que todos los perfiles verticales de fracción de vacío se ajustaban a una función de error fuera cual fuera el número de Froude.

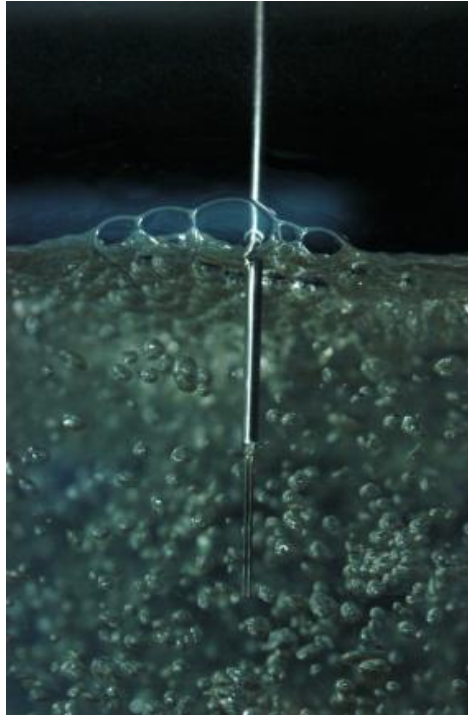


Figura 3.5. Sonda de fibra óptica en un flujo burbujeante

Murzyn et al. [9] han investigado también el movimiento de la superficie libre usando dos finos medidores de alambre hechos a mano (diámetro = 0,05 mm, con 1 mm de separación). Se ha realizado una nueva descripción de la dinámica de la superficie libre con el fin de investigar la interacción con la turbulencia. Esta parte puede ser considerada independiente del flujo burbujeante. Sin embargo, el comportamiento de la superficie libre influye considerablemente en la dinámica del flujo. Respecto a los niveles en la superficie libre, sus resultados señalan un máximo de fluctuaciones turbulentas en la primera mitad de la ola, donde la producción de turbulencia es más intensa.

Aguas abajo de este máximo, los niveles de turbulencia normalmente disminuían hasta alcanzar niveles mínimos. Además, utilizando una técnica de correlación, las longitudes de escala típicas han resultado ser menores a  $5d_1$  refiriéndose a las estructuras turbulentas que se forman en la superficie libre e indicando que las condiciones aguas arriba tienen alguna influencia sobre las escalas predominantes del flujo. Otras contribuciones fueron obtenidas de diferentes formas con diferentes objetivos, mediante técnicas no intrusivas (PIV o LDV), o mediante técnicas intrusivas no del todo satisfactorias.

Mossa y Tolve [10] realizaron una importante contribución. Utilizaron una cámara de vídeo para analizar la concentración de aire presente en los saltos hidráulicos mediante procesamiento de imágenes. Su técnica no invasiva era capaz, no sólo de

evaluar la concentración de aire perfectamente, sino de visualizar coherentemente las estructuras de turbulencia. Sin embargo, esta técnica estaba limitada a las condiciones experimentales. De todas formas, su técnica parecía ser muy prometedora para futuras investigaciones.

Continuando con el desarrollo de nuevas técnicas experimentales en mecánica de fluidos como la Fluorescencia Inducida por Láser (LIF) o la Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV), la Velocimetría Láser Doppler (LDV) y la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) han sido realmente importantes durante los últimos años.

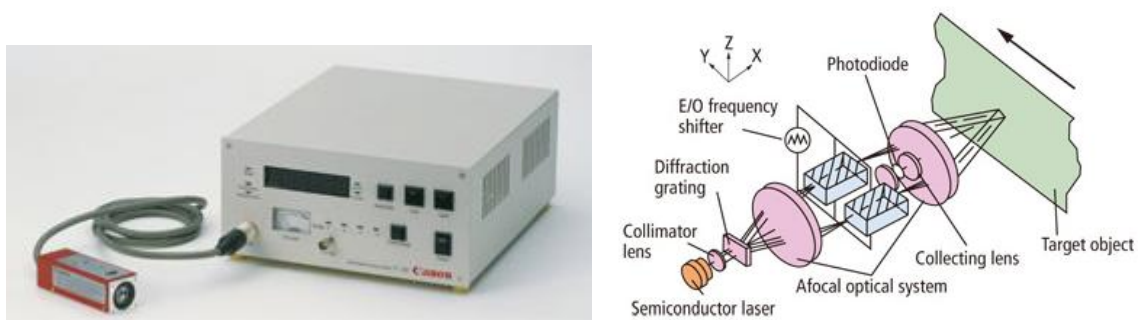


Figura 3.6. Velocimetría Láser Doppler (LDV)

Los sistemas PIV han servido para todo tipo de aplicaciones, incluidas mediciones in situ. Teóricamente, es una técnica no intrusiva aunque ahora se usa en entornos naturales como mares y océanos. Ofrece muchas ventajas como alta resolución espacial y temporal, y medidas instantáneas de los campos de velocidad en 2D/3D.

Al ser una técnica óptica no invasiva (en experimentos de laboratorio), es particularmente adecuada para flujos monofásicos. En realidad, el sistema de medida consiste en una fina capa láser que ilumina una región del flujo. Las posiciones de las partículas situadas en esta capa láser son grabadas. El análisis de la correlación de estas posiciones de las partículas de las diferentes imágenes conduce a los correspondientes vectores de velocidad. Actualmente, ésta es probablemente la técnica más potente para medidas de velocidad de flujo, vorticidad y turbulencia de flujos en estado líquido o gaseoso. Sin embargo, en estudios recientes se han comenzado a analizar los flujos bifásicos y particularmente los resaltos hidráulicos (a bajos números de Froude).

Lennon y Hill [11] examinaron el flujo de un resalto hidráulico mediante el sistema PIV. Esta técnica es bastante limitada para saltos hidráulicos con altos números de Froude, debido a la gran cantidad de burbujas que alteran la trayectoria de la capa láser, por lo que sus trabajos experimentales se realizaron a  $Fr = 1,37, 1,65$  y  $3$ .

En los dos primeros casos los saltos son ondulares, mientras que el último tiene una escasa entrada de aire. Sin embargo, se obtuvieron algunas representaciones de velocidades medias y vorticidades. Esta primera aproximación, es interesante pero parece algo limitada para flujos poco aireados.

Liu et al. [12] utilizaron una sonda microADV para medir la velocidad del flujo en resaltos hidráulicos libres con números de Froude de 2, 2,5 y 3,32. Vieron que este método acústico no era suficientemente fiable debido a los efectos de frontera que incrementaban fuertemente el error relativo de las medidas de velocidad. Comparado con el tubo de Prandtl, el error en la velocidad media medida con el ADV crecía linealmente con la concentración de aire a muy bajas fracciones de vacío. Matos et al. descubrieron que la precisión del ADV era limitada en flujos bifásicos cuando la fracción de vacío excedía el 8%. Por tanto, es razonable pensar que ADV no es adecuado para estudios en resaltos hidráulicos con altos números de Froude.



Figura 3.7. Sonda microADV

Este resumen de las contribuciones experimentales más significativas en los resaltos hidráulicos, conduce a las siguientes conclusiones:

Aunque alguna de las nuevas técnicas están disponibles para investigadores y científicos, como el PIV, LDV o ADV, todavía se considera que las técnicas más precisas son las sondas de conductividad y las sondas ópticas. Estos métodos intrusivos han demostrado tener robustez suficiente en términos de tiempo de respuesta y resoluciones espacio-temporales. En particular, han sido usadas por Rajaratnam, Chanson y Murzyn et al. Además, el reducido tamaño de las puntas reduce los efectos débiles.

El número de Reynolds del flujo más allá de la sonda es bajo. Por ejemplo, era menor a 30 en las mediciones de Murzyn et al. Esto contribuye a minimizar incertidumbres en las medidas. Las sondas ópticas pueden medir tamaños de burbuja por debajo de 10  $\mu\text{m}$  y fracciones de vacío hasta 0,001 o mayores.

Respecto a la adquisición de datos, se debe prestar atención al tiempo y a la frecuencia de muestreo para asegurar su calidad. Para las sondas de conductividad, Chanson realizó un análisis de los efectos del tiempo de muestreo ( $T_{\text{scan}}$ ) y la frecuencia de muestreo ( $F_{\text{scan}}$ ) sobre la fracción de vacío y la frecuencia de paso de burbujas en los resaltos hidráulicos. El tiempo de muestreo fue elegido dentro del rango  $0,7 \text{ s} < T_{\text{scan}} < 300 \text{ s}$  y la frecuencia de muestreo entre  $600 \text{ Hz} < F_{\text{scan}} < 80 \text{ kHz}$ :

- En primer lugar, los datos mostraron que la frecuencia de muestreo no tenía casi ningún efecto sobre la fracción de vacío para una duración de muestra dada. Sin embargo, la frecuencia de paso de burbujas fue despreciada frente a frecuencias de muestra por debajo de 5 a 8 kHz.
- En segundo lugar, la duración de las muestras tenía poco efecto tanto en las fracciones de vacío como en la frecuencia de paso de burbujas para periodos de exploración mayores de 30 a 40 segundos. Por lo tanto, recomendaba un tiempo de muestreo de 45 segundos y una frecuencia de muestreo de 20 kHz. Para sondas ópticas, Murzyn et al. adquirieron los datos durante un máximo de 120 segundos de duración. Sin embargo, tan pronto se registraron unas 10.000 burbujas, la adquisición de datos se paró.

## 3.2 Técnica de medida mediante sondas óptica

Para medidas de parámetros locales, en dinámica de fluidos frecuentemente se utilizan sondas que se introducen en el flujo y miden la velocidad o la fracción de vacío en una posición específica. A pesar de la gran desventaja de distorsionar el flujo en el que están midiendo y del desarrollo de varias técnicas no intrusivas en las que participan láseres, las técnicas mediante sondas son aún las más populares debido a sus grandes ventajas. Estas ventajas son, la increíble capacidad de respuesta y la posibilidad de utilizarlas en medios que por ejemplo los láseres no pueden penetrar.

En la Figura 3.8 se muestra un breve resumen de las numerosas sondas utilizadas para medir la dinámica de los fluidos.

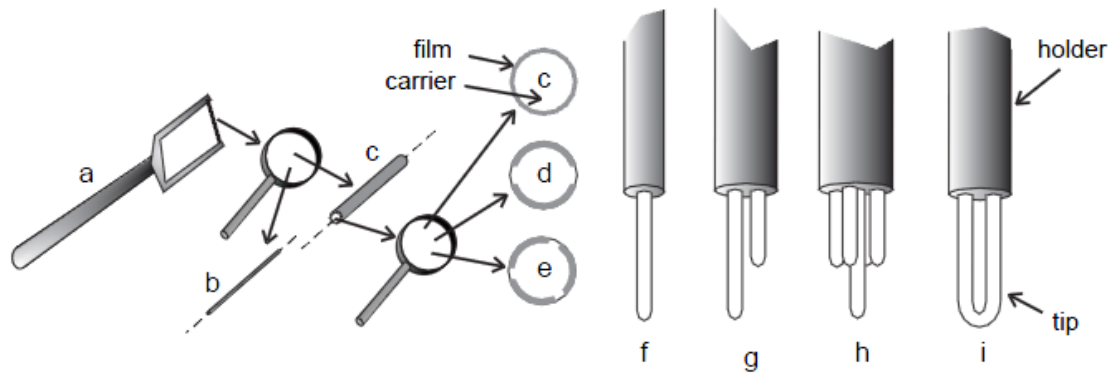


Figura 3.8. Diferentes tipos de sondas utilizadas para las mediciones de la dinámica de fluidos en flujos monofásicos y multifásicos

Una técnica de medida muy extendida en dinámica de fluidos turbulenta son los hilos calientes (Figura 3.8a y 3.8b): la resistividad de un hilo de metal (normalmente de unos pocos mm de longitud y tan fino como varias decenas de micrómetros de diámetro) depende de su temperatura, que a su vez se determina por la pérdida de calor del flujo pasante. La respuesta de esta técnica puede ser mejorada reemplazando el hilo por una película muy fina en el soporte (Figura 3.8c). Dividiendo la película en dos individuales (Figura 3.8d), se pueden distinguir entre direcciones opuestas de la velocidad además de simplemente la magnitud de la velocidad. Menzel et al. (1990) fueron un paso más allá con las sondas divididas en tres (Figura 3.8e), con las que podían además determinar esfuerzos de cortadura.

El campo de aplicación principal de estas sondas son los flujos monofásicos. La aplicación en flujos multifásicos, en particular en flujos burbujeantes, requiere un método apropiado de distinción de fase que es bastante complicado. Además, el comportamiento de las burbujas puede estar influenciado por la alteración del flujo debido a la sonda.

En flujos bifásicos, el mayor área de interés es averiguar qué fase está presente en una posición específica, cuándo y con qué frecuencia. Se han desarrollado varias técnicas y sondas relacionadas para la distinción de fases, todas ellas haciendo uso de las diferencias en las propiedades físicas entre ambas fases. A menudo, se usa la conductividad y la sonda es simplemente un electrodo y normalmente el otro es la placa distribuidora. Cuando la punta de la sonda está rodeada por agua se puede medir una corriente, y cuando una burbuja golpea la punta de la sonda, se aísla la punta. La versión más pequeña de dicha sonda es una única punta (Figura 3.8f), que está limitada para su uso en la detección de presencia de fases en la posición de interés. Cuando una sonda tiene dos puntas (Figura 3.8g), el cálculo del desfase de tiempo entre las dos señales proporciona información de la velocidad de fase y del posible tamaño (como velocidad

y tamaño de burbuja). Usando incluso más puntas, se puede obtener información del movimiento lateral (Figura 3.8h). El espacio entre puntos de una sonda múltiple no debe ser demasiado grande, si se quieren obtener valores precisos de velocidad de burbuja y más aún de diámetro de burbuja.

Las sondas de detección de fase utilizadas en este proyecto, distinguen entre el aire y el agua mediante la diferencia en el índice de refracción entre las fases (concepto que se explicará con mayor detalle en el siguiente apartado). Además de los tipos de sondas anteriores, se han fabricado sondas de diversos diseños y formas (como el de la Figura 3.8i en forma de U) probadas y utilizadas en flujos burbujeantes.

### 3.3 Principio de la sonda óptica

El principio de funcionamiento de las sondas ópticas consiste en que una luz infrarroja es enviada por un extremo de la fibra y recorre la fibra hasta la punta. El extremo de la sonda, donde se encuentra la punta, se sumerge en el medio a estudiar (en nuestro caso el resalto hidráulico). Cuando el índice de refracción del medio alrededor de la punta es menor que el índice de refracción de la punta, parte de la luz se refracta por el flujo y parte se refleja de vuelta en la fibra (Figura 3.9).

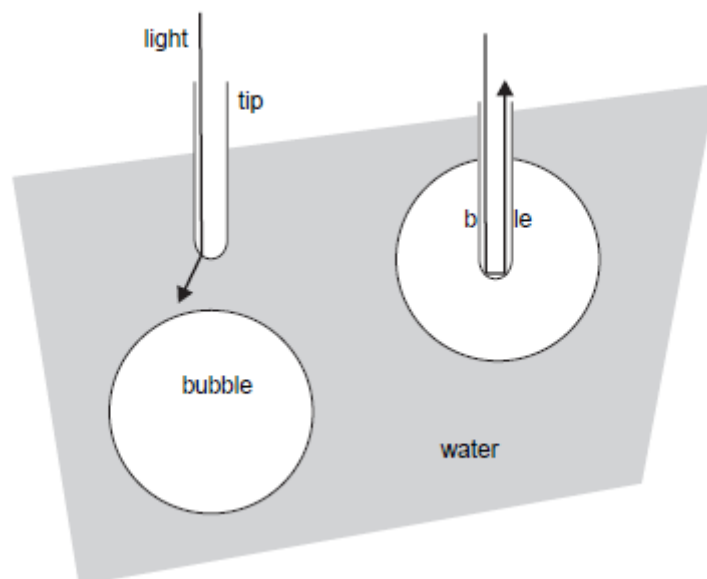


Figura 3.9. Principio de funcionamiento de la sonda

La diferencia en el índice de refracción entre el aire y el agua representa una diferencia bastante grande de la fracción de luz que se refleja de nuevo en la sonda, y en general se dice que cuando la punta está rodeada de agua, la luz que llega a la punta de la sonda se refracta y se pierde en el flujo, pero cuando una burbuja llega a la sonda, la luz se refleja de nuevo en la fibra por reflexión múltiple en la interfaz fibra-aire y puede ser detectado en el otro extremo por un detector sensible a la luz.

Generalmente se utiliza un diodo emisor (LED) como fuente de luz y un fotodiodo como detector. La parte crucial de esta configuración es el divisor en Y (Figura 3.10), que hace posible que la luz reflejada de vuelta a la fibra debido al paso de una burbuja por la punta de la sonda, pueda ser detectada en la misma interfaz por donde la luz es enviada.

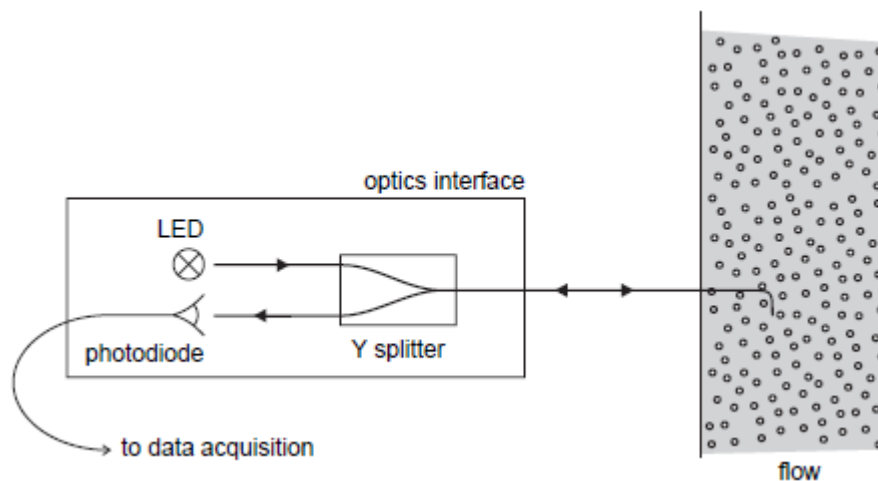


Figura 3.10. Esquema del divisor en Y del módulo opto-electrónico

Las sondas de transmisión de luz o sondas en forma de U (Figura 3.8i) no tienen este problema, ya que son mucho más grandes, no necesariamente más precisas y las últimas comprobadas que son más frágiles. Hasta la fecha, las puntas de fibra óptica han resultado ser sorprendentemente resistentes, aguantando en flujos bifásicos altamente turbulentos aún teniendo un diámetro pequeño entre los 15-20  $\mu\text{m}$ .

La señal  $V(t)$  que observa el fotodiodo debido a una burbuja pasante se muestra en la siguiente figura:



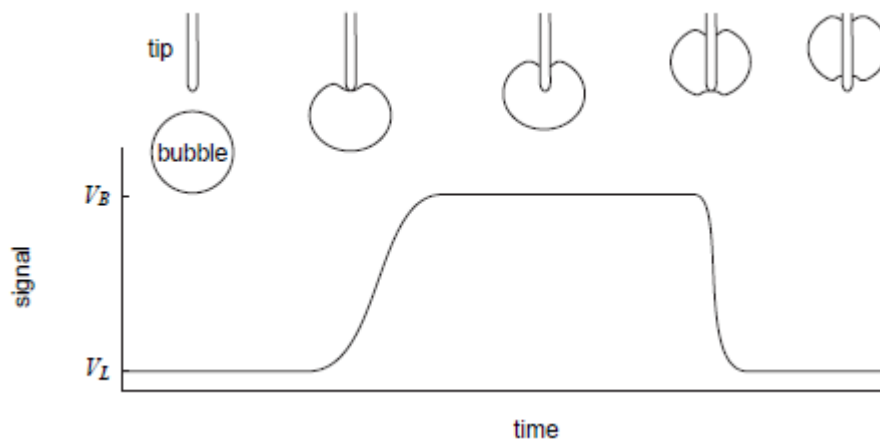


Figura 3.11. Señal de la sonda por el paso de burbuja

Cuando la punta de la sonda está rodeada de agua, la mayor parte de la luz es refractada por el flujo y el fotodiodo detecta una señal muy baja ( $V_L$ ). Tan pronto como la burbuja choca contra la punta, la señal crece rápidamente hasta el nivel correspondiente de mayor luz reflejada de vuelta hacia la fibra ( $V_B$ ). Cuando el fondo de la burbuja alcanza la sonda, en la señal se observa una disminución rápida hasta el nivel del líquido.

Cuando la sonda toca una burbuja, en lugar de perforarla inmediatamente, la burbuja se deforma durante un corto periodo de tiempo debido a efectos de tensión superficial, dando lugar a una fina película líquida entre la sonda y la burbuja. Afortunadamente, esta película es de fina como el diámetro de la punta de la sonda y por lo tanto la sonda actúa como si ya estuviera dentro de la burbuja, aunque le lleve poco tiempo a la burbuja envolver la sonda, conduciendo a un incremento relativamente lento del nivel de señal en este paso (comparado con el paso causado por la burbuja abandonando la sonda). Se han realizado varios intentos usando la pendiente de esta subida como medida para determinar la velocidad de la burbuja, incluso facilitando las mediciones de velocidad con una sonda de una sola punta, pero nunca ha dado resultados satisfactorios.

Cuando el fondo de la burbuja llega a la sonda, una pequeña parte de este fondo se deforma también. En este caso, la luz se refractará en el líquido directamente, probablemente desestimando el tiempo en que la burbuja estuvo presente en la punta. Esto conduce a un gran descenso de la señal de vuelta al nivel del líquido. Sin embargo, esta deformación no tiene de ninguna manera tanto impacto como la deformación de la nariz de la burbuja al chocar contra la sonda y su efecto se considera pequeño.

La Figura 3.11 se corresponde con un caso ideal de burbuja ascendiendo por el centro del eje de una sola punta. Pero en nuestro experimento, además de tener una sonda óptica con dos puntas en vez de una (por lo que habrá dos señales correspondientes al *ch1* y *ch2*), la dirección de las burbujas que chocan contra las puntas es totalmente aleatoria, por lo que la mayoría de las burbujas no llegarán a la sonda en condiciones ideales, perdiéndose calidad de señal en alguno de los dos canales.

A continuación se muestran dos ejemplos de medidas experimentales: una en condiciones casi ideales (Figura 3.12) y otra con una enorme pérdida de señal debido al mal direccionamiento de la burbuja hacia la sonda o que simplemente explota antes de llegar a la segunda (Figura 3.13):

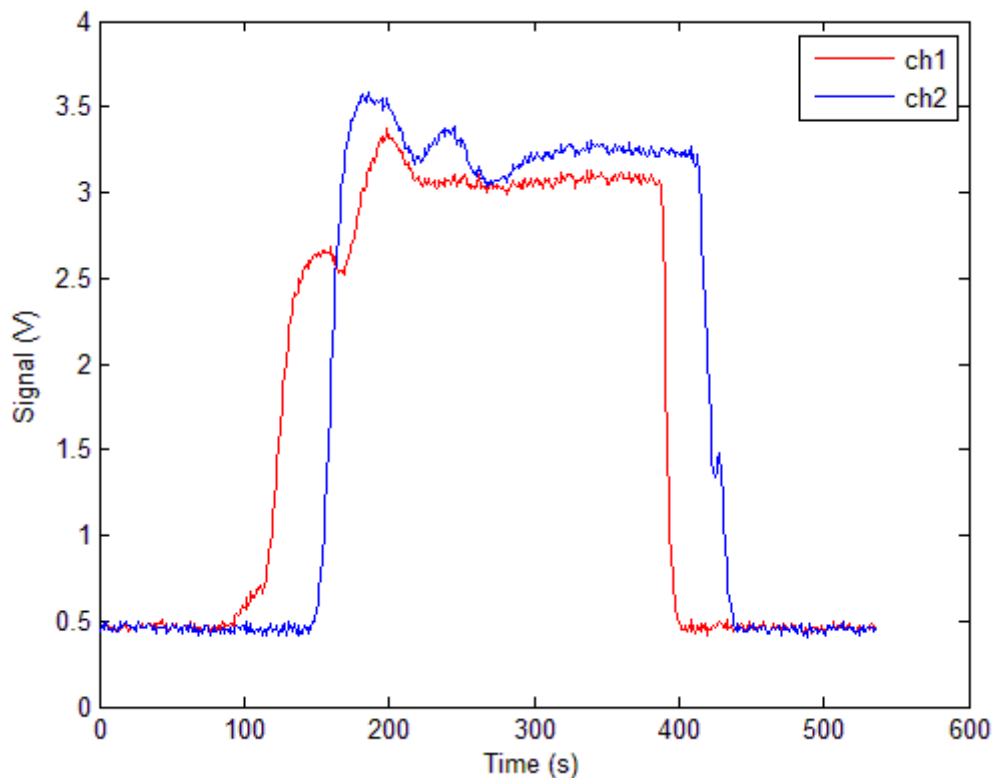


Figura 3.12. Caso ideal experimental de burbuja atravesando la sonda

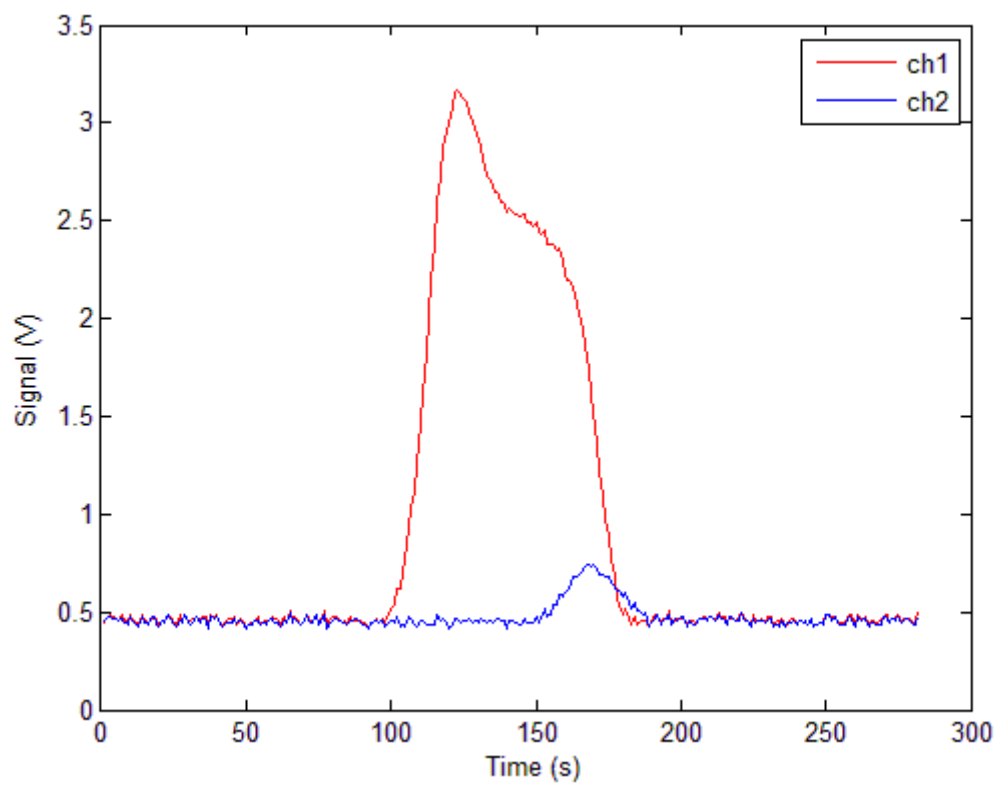


Figura 3.13. Pérdida de señal en el segundo canal

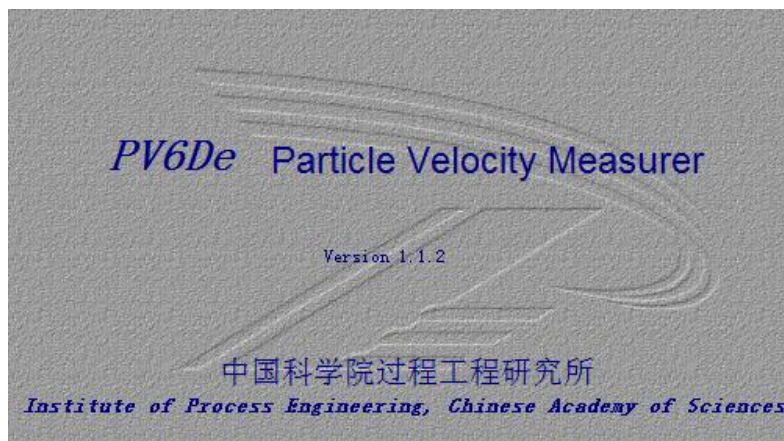


# Capítulo 4

## 4 Análisis de datos

### 4.1 Software de análisis

Se utilizó un software especializado, llamado Particle Velocity Measurer PV6D desarrollado por el Instituto de Ingeniería de Procesos de la Academia de Ciencias China (Beijing), para simular la adquisición de datos. Mediante este programa se pueden obtener parámetros importantes del flujo, como veremos más adelante. También se utilizó el software de cálculo MATLAB, con el que se ha realizado un código que permite obtener información precisa de las señales que se obtienen de la sonda óptica.



## 4.2 Diferencias entre PV6D y MATLAB

En este apartado se van a exponer las principales diferencias que se han ido observando entre los dos programas a la hora de obtener resultados, donde se pondrán de manifiesto las grandes debilidades que tiene el software PV6D frente a MATLAB:

- **Visualización de señales:** Mientras que en el PV6D las señales correspondientes a cada punta se presentan en ventanas independientes, en MATLAB se han hecho coincidir ambas señales en la misma gráfica para una mejor comparación entre ambas. La visualización que ofrece MATLAB de las señales (Figura 4.2) es mucho más clara y completa en comparación con el PV6D, donde no se ve la señal de manera precisa (Figura 4.1).
- **Selección de intervalos:** En PV6D, para obtener información de las burbujas pasantes correspondientes a los picos de señal, es necesario seleccionar manualmente los intervalos que abarcan dichos picos de señal. En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo de intervalo seleccionado [453,8 ms – 658,6 ms]. Sin embargo, con MATLAB se ha programado para que de manera automática detecte los intervalos donde existen burbujas y se extraiga toda la información presente en las señales de manera precisa.

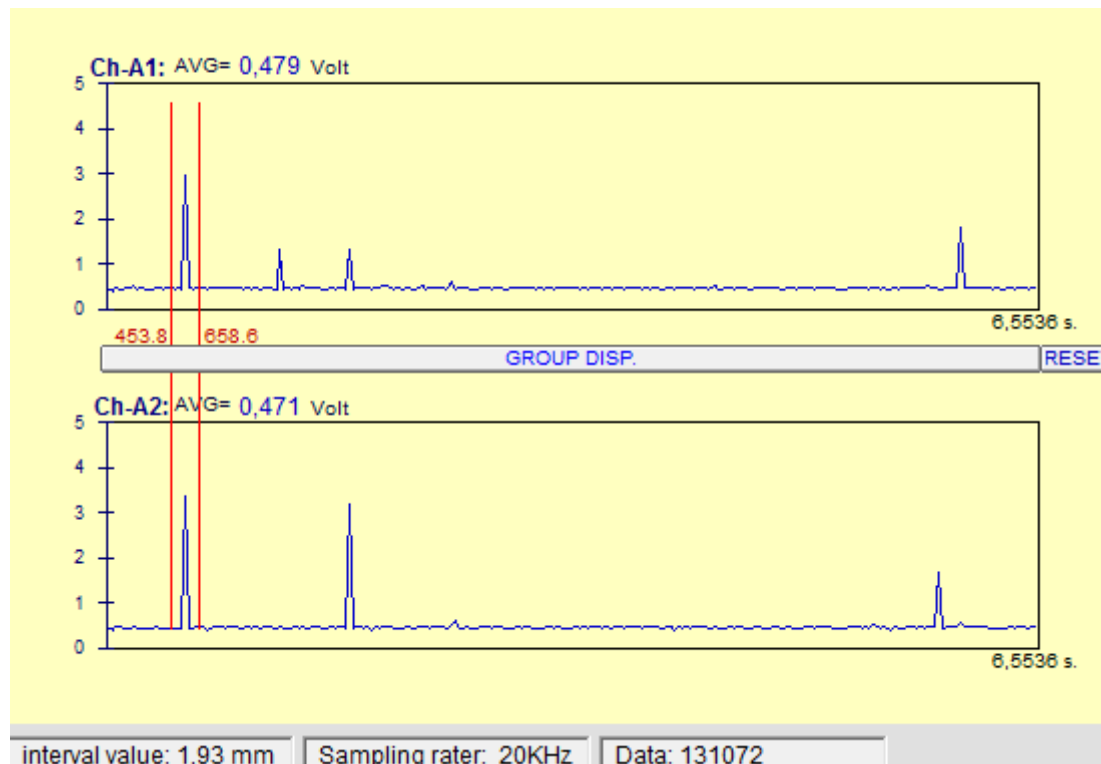


Figura 4.1. Presentación de las señales en PV6D

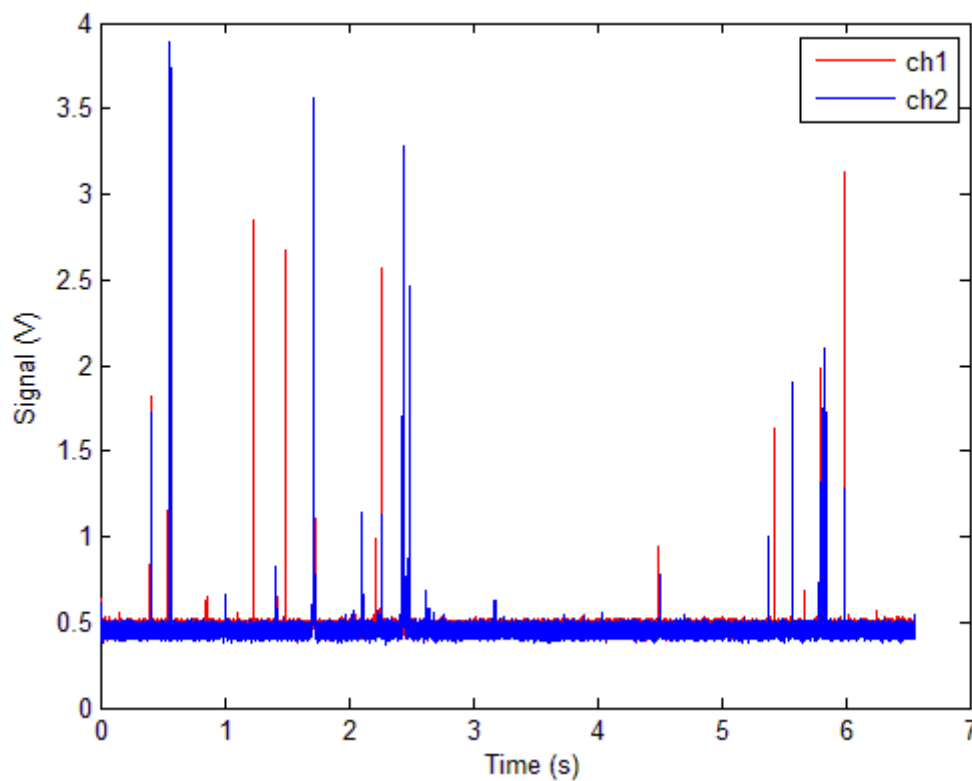


Figura 4.2. Presentación de las señales en MATLAB

- **Señales ocultas:** Mediante esta forma de detectar los intervalos automáticamente con MATLAB nos aseguraremos de haber buscado en toda la señal todos los picos correspondientes a las posibles burbujas. Sin embargo, esto no ocurre con el PV6D que al ser un método manual con una pobre visualización, nos iremos a los lugares donde a simple vista parezca más claro que hay una burbuja, es decir a los picos. Pero si sólo nos limitamos a coger esos trozos de señal, no estaremos teniendo en cuenta ciertas zonas en las que a simple vista no hay nada, pero que en realidad si se amplía dicha zona puede existir un pico de señal, además considerable.

En la Figura 4.3 se ve un claro ejemplo, donde en el intervalo [1,665 s – 1,870 s] a simple vista sólo existe ruido, es decir fase líquida, pero que si ampliamos en esa zona se observan dos picos de señal en ambos canales de unos 3 V de intensidad (Figura 4.4). Pues lo mismo ocurre en muchas otras zonas de la señal, donde parece que hay simplemente ruido, pero en realidad hay señales ocultas.

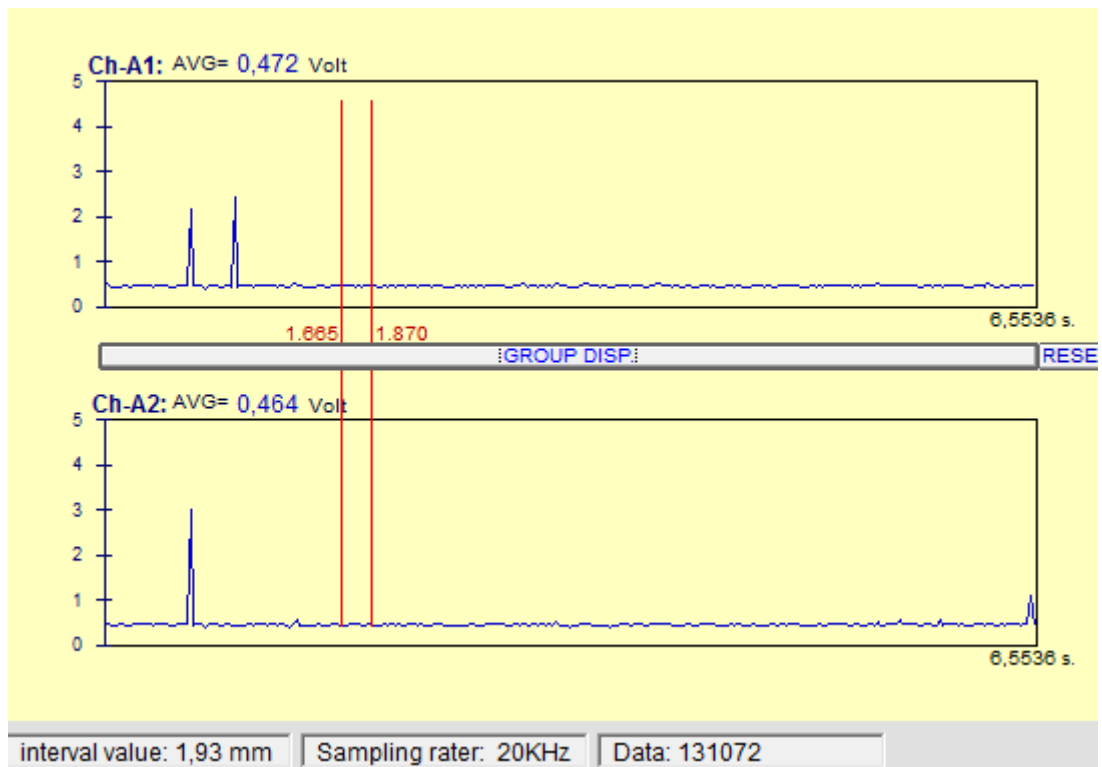


Figura 4.3. Intervalo con señales ocultas

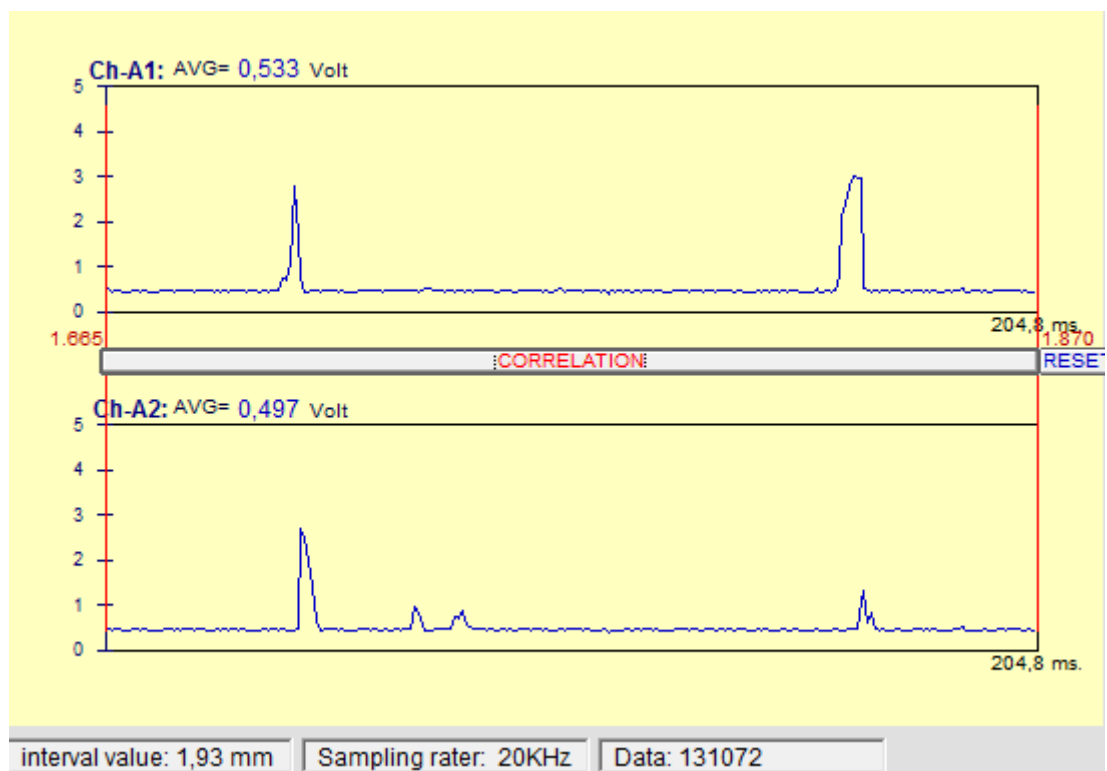


Figura 4.4. Señales ocultas



- **Ancho de los intervalos:** En ambos programas existe la posibilidad de ampliar la zona donde haya fase gaseosa en ambos canales, y de la que obtendremos los parámetros importantes de flujo. Esta operación es clave, ya que un intervalo excesivamente grande tendrá señal de más que no nos hace falta para el estudio, por lo que se perderá precisión en los resultados.

Mediante el programa PV6D sólo se pueden escoger intervalos determinados, siendo el valor mínimo de 12.8 ms:

12.8 ms (Min), 25.6 ms, 51.2 ms, 102.4 ms y 204.8 ms (Max)

Debido a la imposibilidad de estrechar más los intervalos, no se pueden ajustar las señales con la precisión adecuada, por lo que los picos de señal (fase gaseosa) llevarán mucho ruido incorporado (fase líquida) o incluso podrán albergar trozos de señal adyacentes, que serán los que realmente dañarán la medida. Sin embargo, con MATLAB este problema no existe, ya que en la programación se puede definir la precisión que se quiera dar a ese intervalo. Por lo que una vez detectada la presencia de una burbuja en ambos canales, se han tomado trozos muy pequeños de señal, antes y después de una burbuja para evitar de esa manera el problema de posibles señales adyacentes (Figura 4.5).

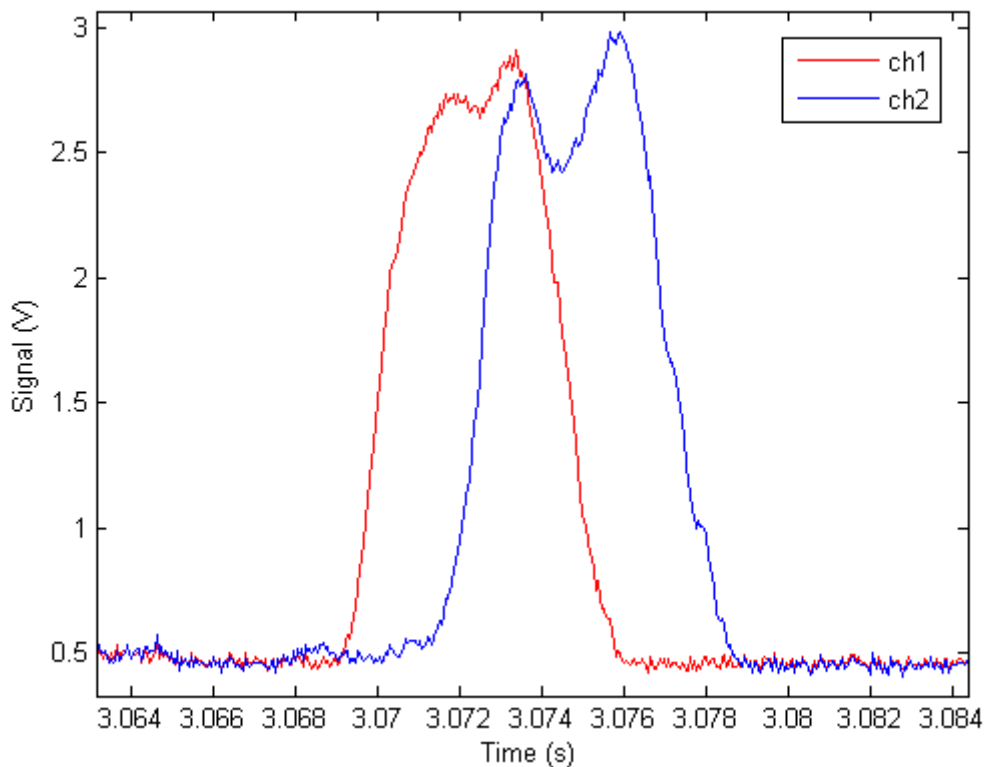


Figura 4.5. Señal en MATLAB con pequeños intervalos de ruido

- **Presentación de resultados:** En PV6D, una vez definido el intervalo de medida, los resultados se presentan en una ventana dividida en 4 gráficas y 2 tablas (Figura 4.6). De todas ellas, lo más interesante será la tabla de la izquierda, donde se encuentran los valores de desfase entre señales o *Delay* (ms), velocidad de burbuja o *V.ave.* (m/seg) y la correlación entre señales o *Correlation*.

En MATLAB, los valores se presentan dentro de las variables que se han definido durante la programación, que en este caso son  $dt$  (ms),  $U$  (m/seg) y  $C_{12}$ . Pero además, con MATLAB se pueden obtener otros parámetros adicionales como el Diámetro de la burbuja, la Fracción de Vacío, etc. como veremos más adelante.

La comparación entre los resultados obtenidos entre ambos programas se mostrará en el capítulo 5.

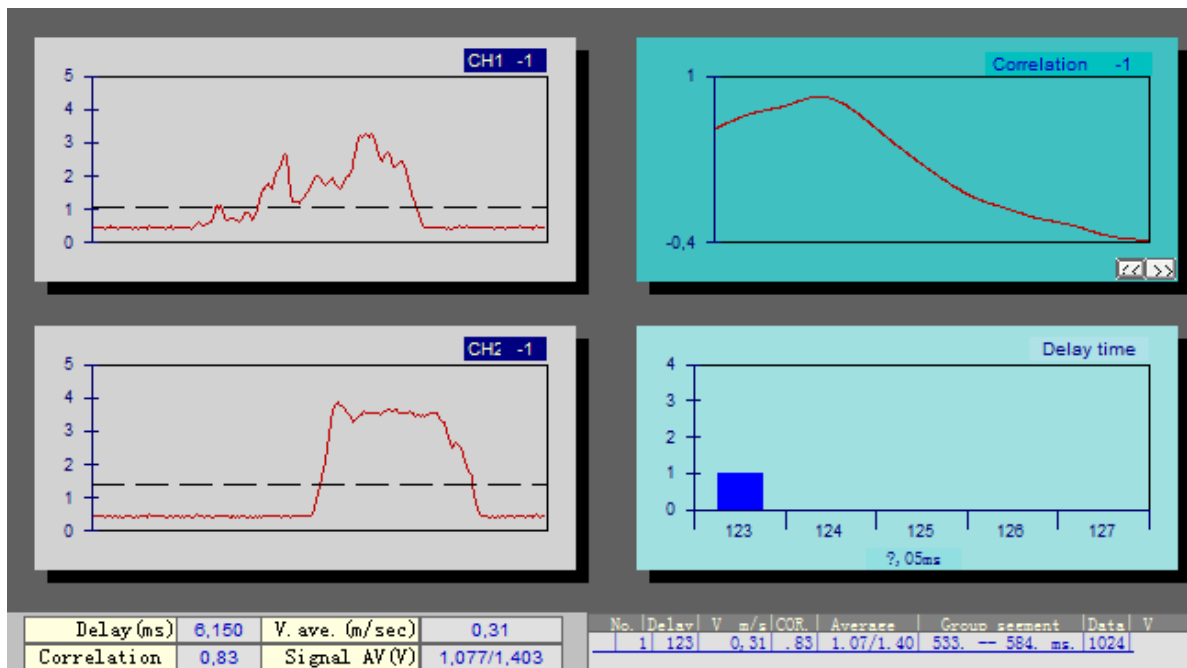


Figura 4.6. Presentación de resultados en PV6D

## 4.3 Obtención características de las burbujas

### 4.3.1 Fracción de vacío

Para determinar la fracción de vacío de la señal de datos en bruto, la señal se ha de separar en la contribución de las burbujas y la contribución del líquido. Esta separación se realiza mediante la aplicación de un umbral: cuando la señal del fotodetector sobrepase un umbral de valor  $V_{th}$ , se considerará que la sonda se encuentra en una burbuja. Si por el contrario, la señal está por debajo del valor del umbral, la punta estará rodeada de fase líquida (ver Figura 4.7).

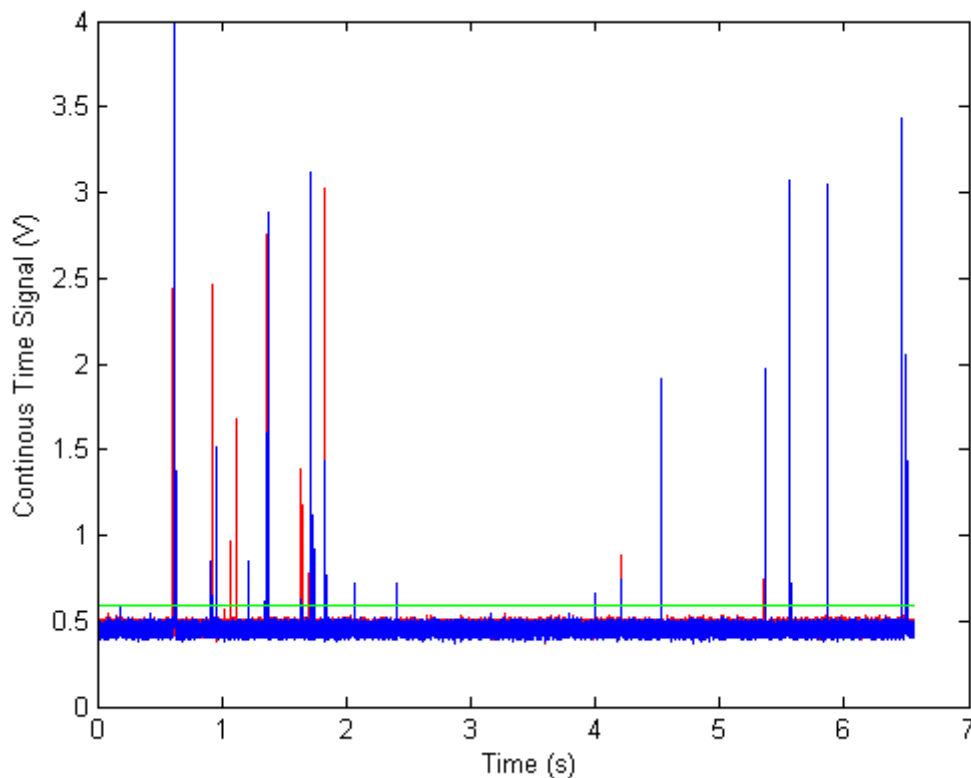


Figura 4.7. Umbral sobre la señal en bruto

La longitud de cuerda de las burbujas pasantes varía, como se puede apreciar en la Figura 4.8. Esto es debido a las diferencias de velocidad con las que las burbujas alcanzan la punta de la sonda, o a que la sonda recibe el impacto de varias burbujas en diferentes posiciones, registrando diferentes longitudes de cuerda. Esto último se puede apreciar en la Figura 4.9, donde se observa cómo dependiendo de la zona de contacto de la punta de la sonda con la burbuja, la señal adoptará una forma u otra.

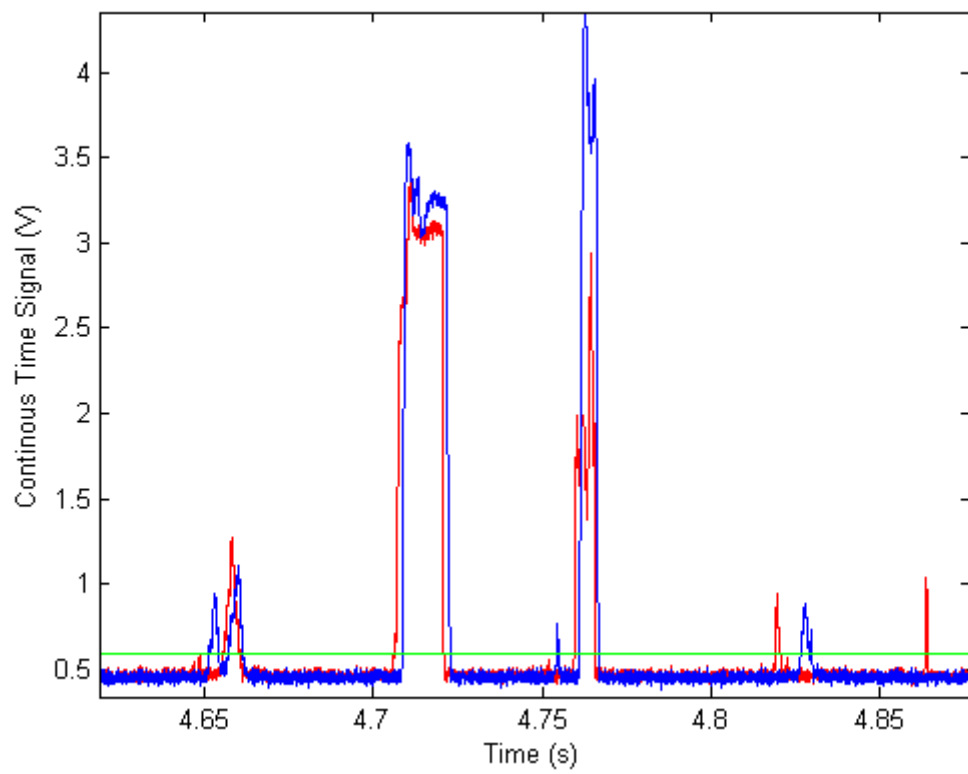


Figura 4.8. Diferentes longitudes de cuerda de burbuja

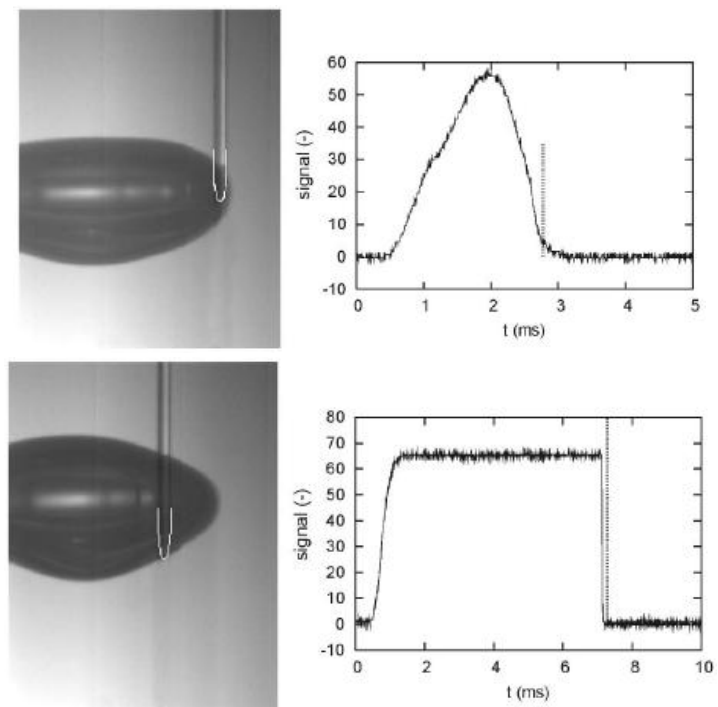


Figura 4.9. Impacto de sonda en diferentes zonas de la burbuja

La señal de tiempo del fotodetector (que varía continuamente entre  $V_L$  y  $V_B$ ) es convertida a una señal de tiempo discreta, donde “0” representa la fase líquida y “1” denota la presencia de una burbuja:

$$s(t) = \begin{cases} 0 & \forall V(t) < V_{th} \\ 1 & \forall V(t) > V_{th} \end{cases}$$

En la Figura 4.10 se muestra la conversión de la señal continua inicial a una señal temporal discreta, que nos permitirá calcular la fracción de vacío como veremos más adelante. Además se da un detalle de una zona concreta de la señal, en la que se observan las diferentes longitudes que tienen las burbujas debido a lo comentado anteriormente.

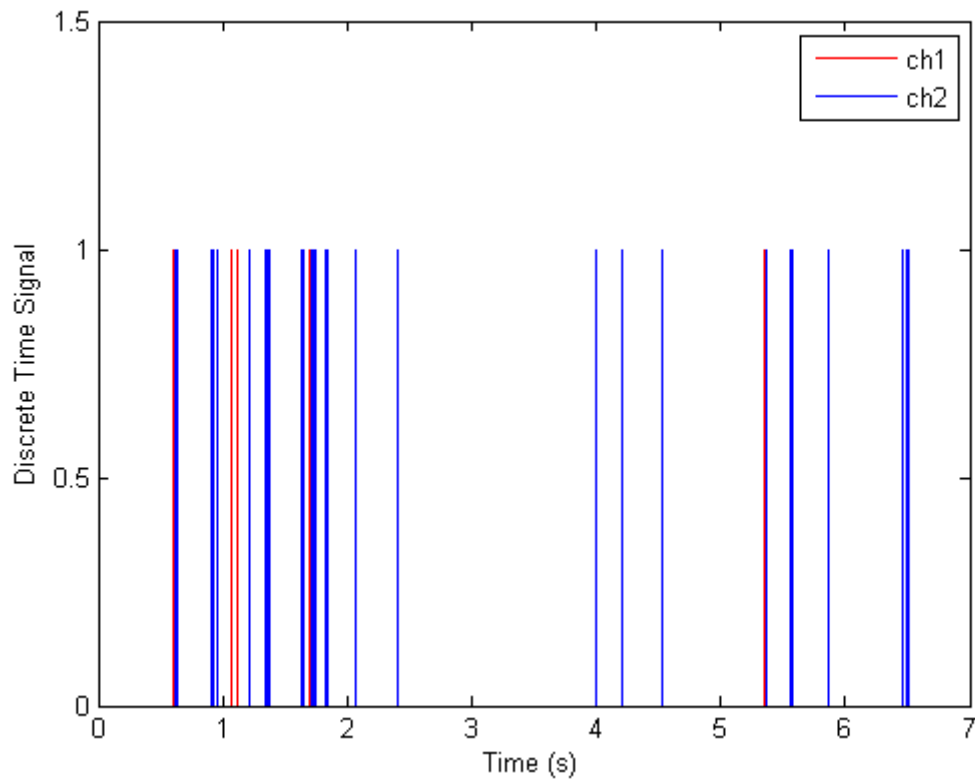


Figura 4.10. Discretización de la señal temporal completa

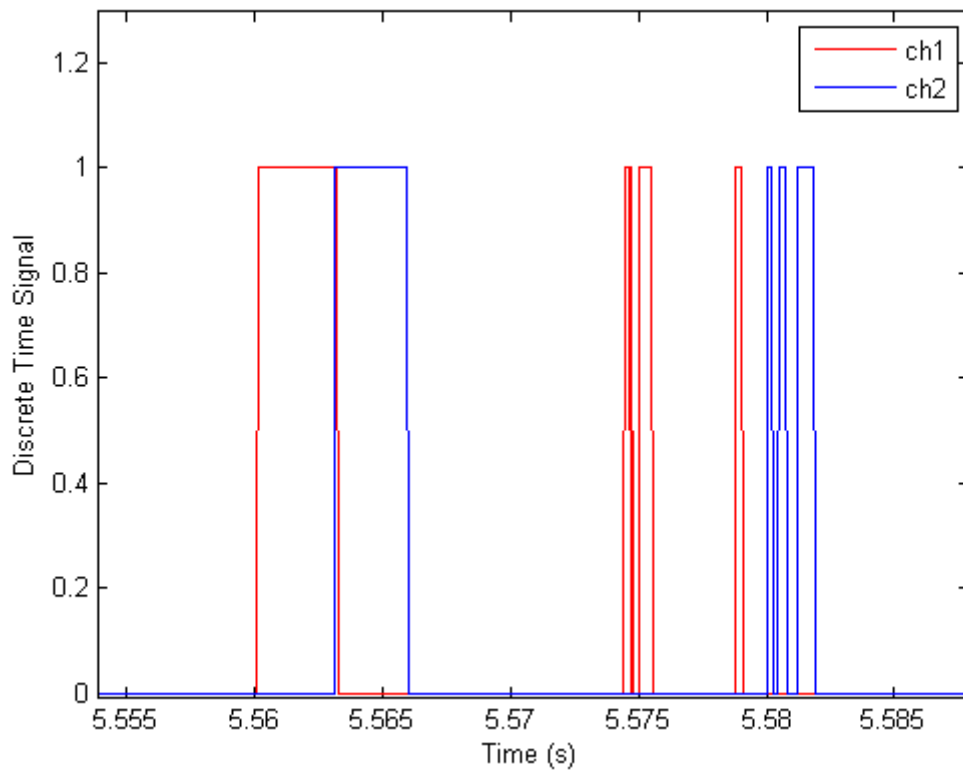


Figura 4.11. Discretización de un trozo de señal temporal

El valor de  $V_{th}$  debe ser elegido lo suficientemente bajo como para estimar correctamente la cantidad de aire presente, y cuanto más cercano esté de  $V_L$  más precisa será la medición. Pero también ha de tenerse en cuenta que dicho umbral ha de ser lo suficientemente grande como para evitar falsos registros de burbujas.

Para obtener el valor de  $V_{th}$  hace falta calcular el valor de la media de la señal:

$$V_{th} = media + K \cdot media$$

$$V_{th} = media(1 + K)$$

Siendo  $K$  una constante, cuyo valor óptimo ha sido obtenido mediante prueba y error, oscilando entre un 20% y un 25%.

Al tener las dos señales unas medias muy parecidas (como podemos ver en la Tabla 4.1) el mismo umbral  $V_{th}$  servirá de corte para ambas señales.

Nº medición	media 1 (V)	media 2 (V)
1	0,4719	0,4657
2	0,4685	0,4561
3	0,4786	0,4714
4	0,4647	0,4545
5	0,4727	0,461
6	0,4762	0,4656
7	0,469	0,4553
8	0,472	0,4637
9	0,4707	0,4599

Tabla 4.1. Valores de las medias de cada señal en cada medición

De esta manera se separan las señales pertenecientes a burbujas pasantes de longitud  $T_B(i)$  de la señal de fase líquida. El tiempo total de burbuja de la medida es  $T_B = \sum_i T_B(i)$ . Siendo  $T$  el tiempo total de medida, el tiempo medio de fase gaseosa retenida en forma de burbujas en la posición de la sonda puede estimarse directamente como:

$$\alpha = \frac{T_B}{T}$$

La ecuación anterior podemos expresarla como:

$$T_B = \int_T s(t)dt$$

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_T s(t)dt = \overline{s(t)}$$

De esta manera, la fracción de vacío es simplemente el tiempo medio de la señal de tiempo discreta. Por supuesto, los datos son muestreados y una medición consiste en  $N$  puntos (a una velocidad de  $\frac{N}{T}$ ), por lo que la fracción de vacío se puede estimar como:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N s[n] = \overline{s[n]}$$

Obtenida la fracción de vacío de las burbujas, pasaremos ahora a calcular la velocidad y el diámetro de las burbujas. Para estudiar la dinámica existente dentro de los datos temporales se van a calcular las funciones de correlación, que nos permiten medir el grado de semejanza entre las dos señales o bien el grado de semejanza entre una señal y la misma pero desplazada en el tiempo (autocorrelación).

### 4.3.2 Autocorrelación

Como se comentó en el capítulo 1, los valores de velocidad en una posición dada en dos instantes  $t_1$  y  $t_2$  no son independientes. La dependencia de las dos velocidades viene dada por la autocorrelación, que para un flujo estacionario es función del desfase  $\tau = t_2 - t_1$ . A continuación se muestra la representación gráfica de la autocorrelación en función del desfase para un trozo de señal con presencia de burbuja.

En esta gráfica se puede observar cómo la correlación es alta para desfases pequeños y decrece hasta cero a medida que aumenta el desfase. Otra característica es la simetría respecto al eje X en el punto cero, donde se alcanza la correlación máxima.

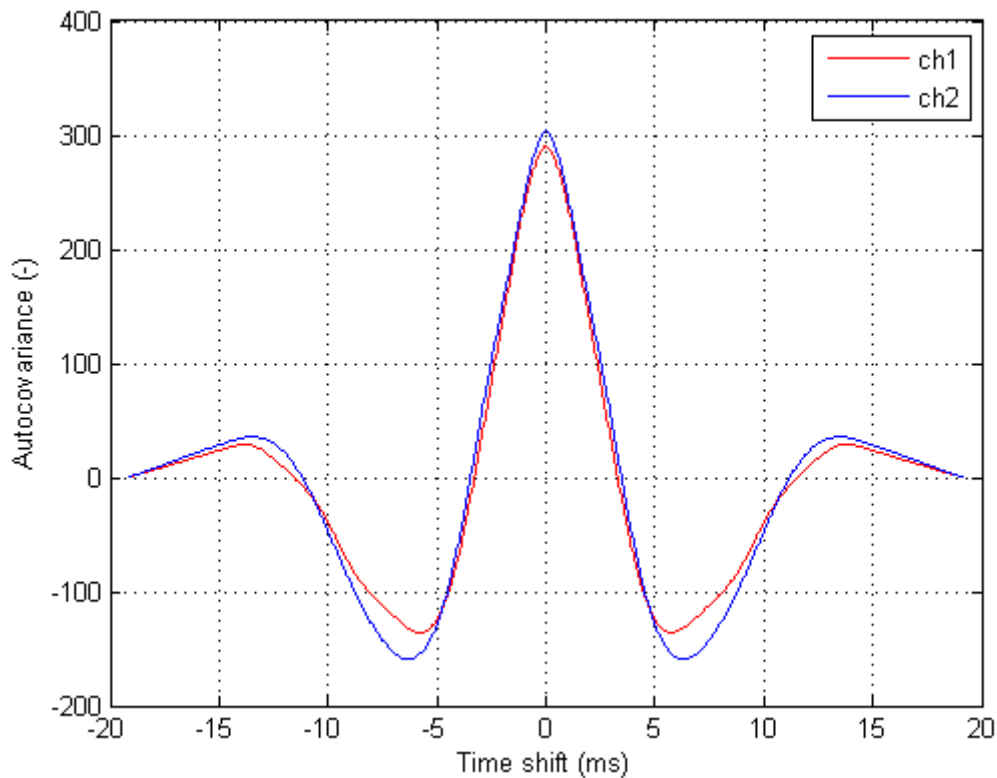


Figura 4.12. Función de autocorrelación simétrica de señales



Al tratarse de una función simétrica, para facilitar una mejor visualización de la función de autocorrelación nos quedaremos con la parte positiva del desfase. En la Figura 4.13 se han comparado las dos funciones de autocorrelación correspondientes a las señales proporcionadas por las dos puntas de la sonda separadas 1,93 mm entre sí, al paso de una burbuja. Más adelante se explicará con más detalle la forma que puede adoptar la función de autocorrelación a partir del cero.

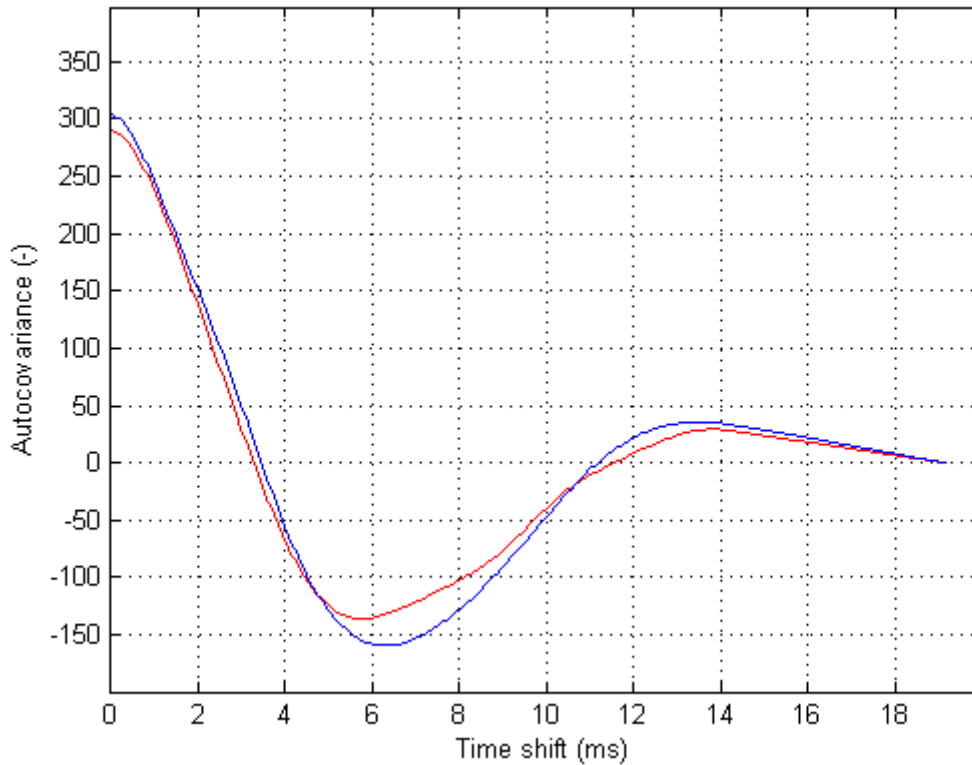


Figura 4.13. Parte positiva de la función de autocorrelación de señales

La aplicación del análisis de autocorrelación a una señal de indicación de fase como la recogida por las fibras ópticas, se resume en la Figura 4.14.

El paso de una burbuja produce una señal cuadrada de longitud  $t_b$  y la autocorrelación de esta señal es un triángulo (Figura 4.14a). Antes de calcular la función de autocorrelación (FAC) de la señal, primero se extrae la media ( $= \alpha$ ) de la señal (Figuras 4.14b y 4.14c), estableciendo los límites de la señal en  $-\alpha$  y  $(1-\alpha)$ .

La autocorrelación tiene la forma que se muestra en la Figura 4.14d. En variaciones de tiempo cortas predomina la forma triangular, referida al tiempo medio de paso de burbuja.

Como por lo general a una burbuja le sigue una porción de agua, en los periodos de tiempo justo por encima de los periodos correspondientes a las burbujas, se observa falta de correlación. Debido a que la llegada de burbujas a la punta de la sonda no se produce a intervalos regulares, la autocorrelación en los periodos de tiempo justo a continuación de los periodos de paso de burbuja se aproxima rápidamente a cero.

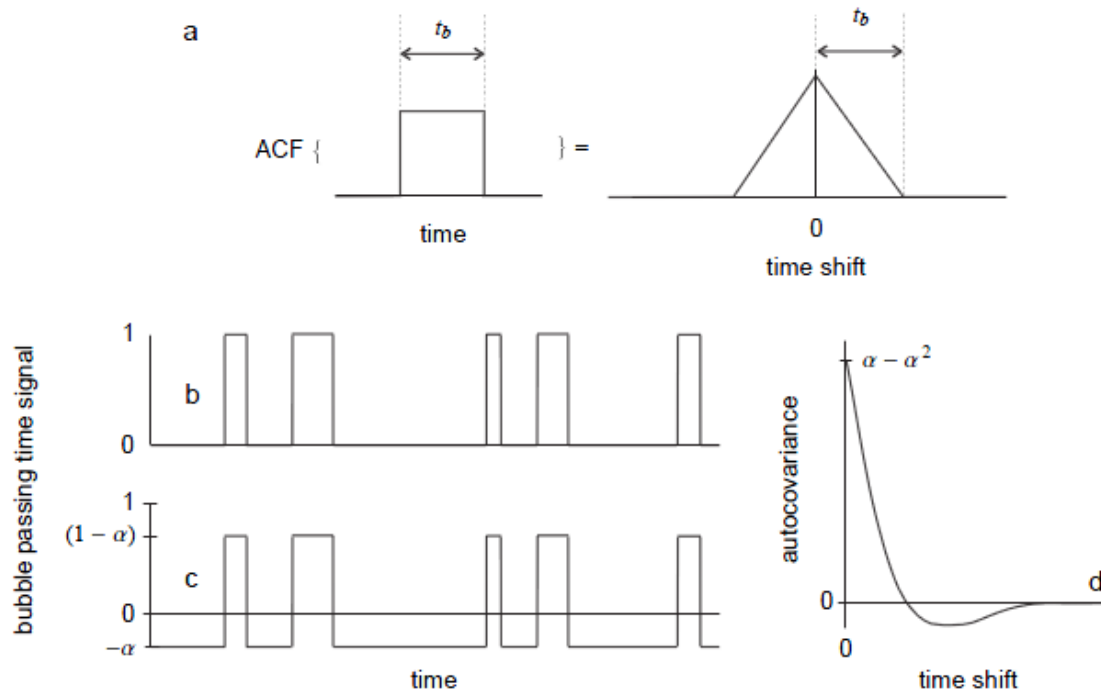


Figura 4.14. Autocorrelación de la señal de una sonda de fibra óptica:

- La autocorrelación de una señal cuadrada es una señal triangular
- Señal temporal del paso de una burbuja
- Señal temporal del paso de una burbuja, sin la media
- Función de autocorrelación (FAC) de la señal temporal del paso de una burbuja en un régimen de flujo burbujeante homogéneo

Sin embargo, en un flujo burbujeante de régimen turbulento como el resalto hidráulico, se forman “agrupaciones de burbujas” cuya escala típica de tiempos se encuentra a continuación de la escala de tiempo de la burbuja única. Las agrupaciones de burbujas pueden ser consideradas como porciones del flujo con una gran cantidad de burbujas (o alta fracción de vacío) seguidas de una parte con pocas burbujas.

Aunque estas agrupaciones de burbujas tendrán una aportación mucho menor que la burbuja principal a la función de autocorrelación, aparecen en las funciones de autocorrelación (Figura 4.15).

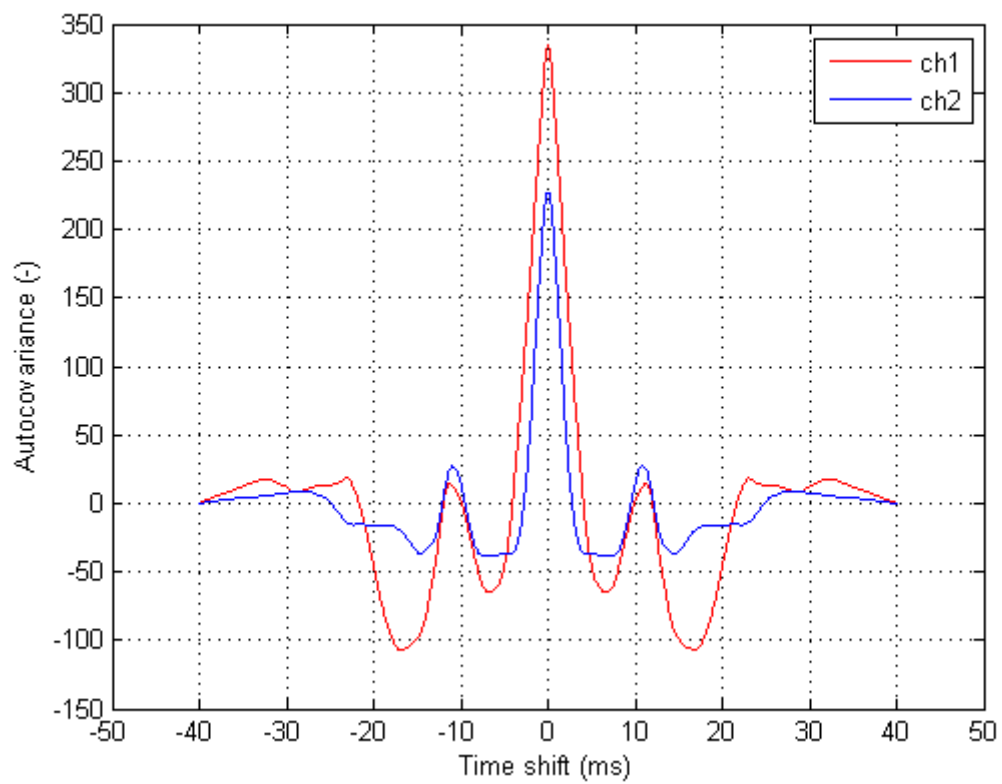
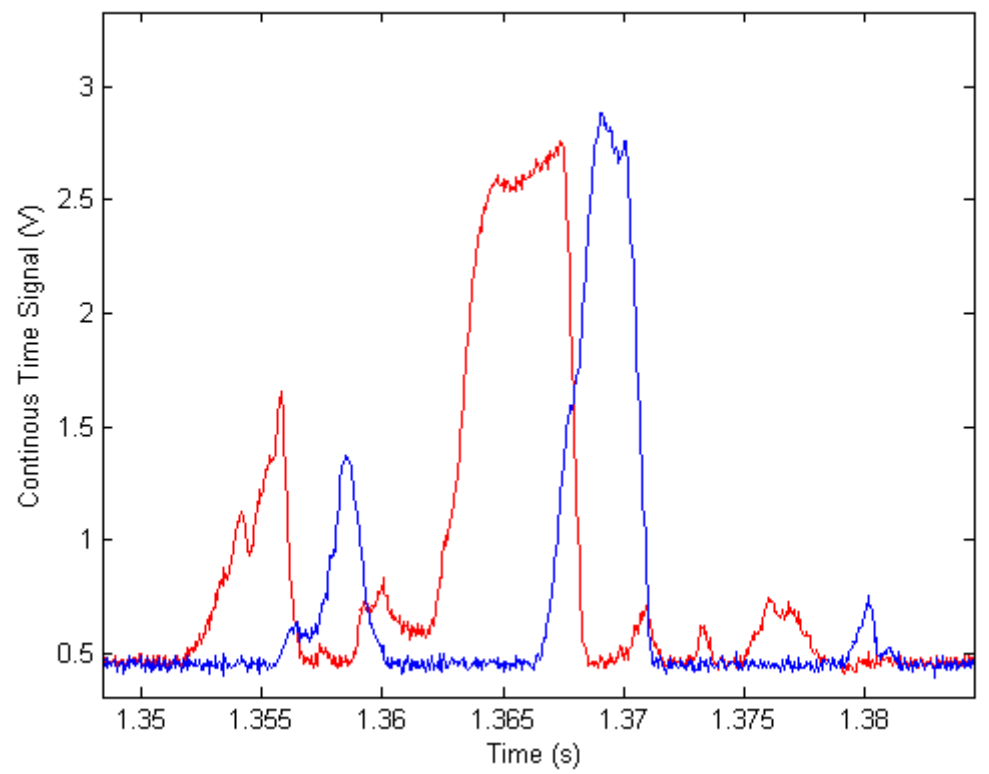


Figura 4.15. Función de autocorrelación de agrupaciones de burbujas

Por tanto, la función de autocorrelación de la señal temporal perteneciente al paso de una burbuja está construida a partir de las siguientes dos contribuciones:

- Forma triangular para desfases de tiempo pequeños.
- En caso de que haya, una cola determinada por agrupaciones de burbujas en una escala temporal mayor.

Esta escala temporal de las agrupaciones de burbujas podría estar relacionada muy probablemente con la integral de la escala temporal  $T_{xx}$  del flujo turbulento. En principio, si en el flujo se producen oscilaciones a grandes escalas y de manera relativamente regular en el flujo, en la función de autocorrelación debería aparecer en forma de coseno.

Para velocidades de burbuja bajas, la función de autocorrelación corta en cero rápidamente, mientras que para velocidades más altas permanece positiva durante mucho más tiempo.

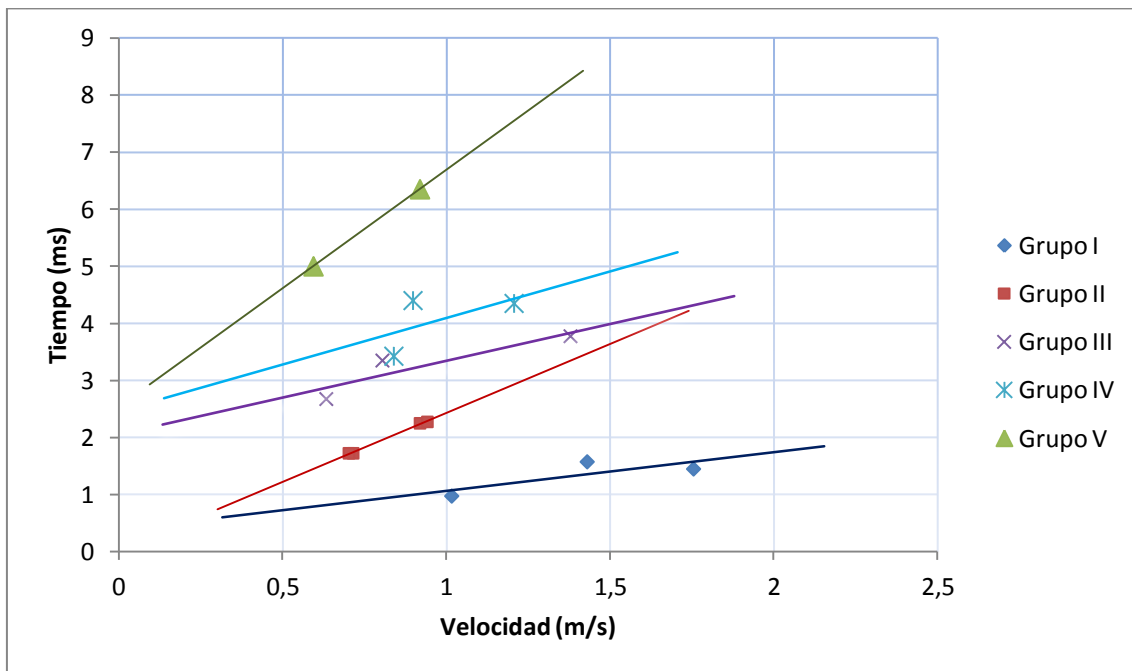


Figura 4.16. Tiempo que tarda en alcanzar correlación cero la FAC en función de la velocidad de burbuja

Esto se puede observar en la Figura 4.16 donde, de todos los datos recogidos durante los experimentos, se han seleccionado sólo los que cumplen los siguientes criterios de validación, recogándose en la Tabla 4.2:

- La diferencia entre los máximos de las FAC de las dos señales, correspondientes a las dos puntas de la sonda, sea mayor al 50%.
- La relación de diámetros de burbuja ( $D/d$ ) sea menor a 1,7.
- La correlación entre las dos señales sea mayor a 0,7.

	$U_B$ (m/s)	tiempo (ms)	F vacío media	Max FAC	GRUPO
	1,0158	0,975	0,00033	5,1615	I
	1,4296	1,575	0,00075	6,861	
	1,7545	1,45	0,00065	73,055	
⇒	0,7148	1,725	0,00055	122,745	II
	0,919	2,25	0,00065	132,635	
	0,7018	1,725	0,00045	148,85	
	0,9415	2,275	0,00065	195,90	
	0,6328	2,675	0,0007	259,6	III
	0,8042	3,35	0,00104	296,9	
	1,3786	3,775	0,0014	340,4	
	0,8391	3,425	0,0009	457,4	IV
	0,8977	4,4	0,00135	553,75	
	1,2063	4,68	0,00145	539,77	
⇒	0,5938	5	0,00175	727,6	V
	0,919	6,35	0,00255	886,25	

Tabla 4.2. Datos que cumplen los criterios de validación

Los datos se han dividido en cinco grupos en función del valor del máximo de la función de autocorrelación, tratando que los valores de cada grupo sean lo más parecidos posibles.

Un claro ejemplo de por qué esta división, se da en el valor de  $U_B = 0,919$  m/s del Grupo II y V (ver Tabla 4.2). Al tener tiempos de corte en cero muy diferentes y máximos de la FAC muy diferentes también, no son datos que puedan compararse entre sí, ya que pertenecerán a burbujas de características totalmente diferentes. A continuación, en la Figura 4.17 se representan dichas burbujas:

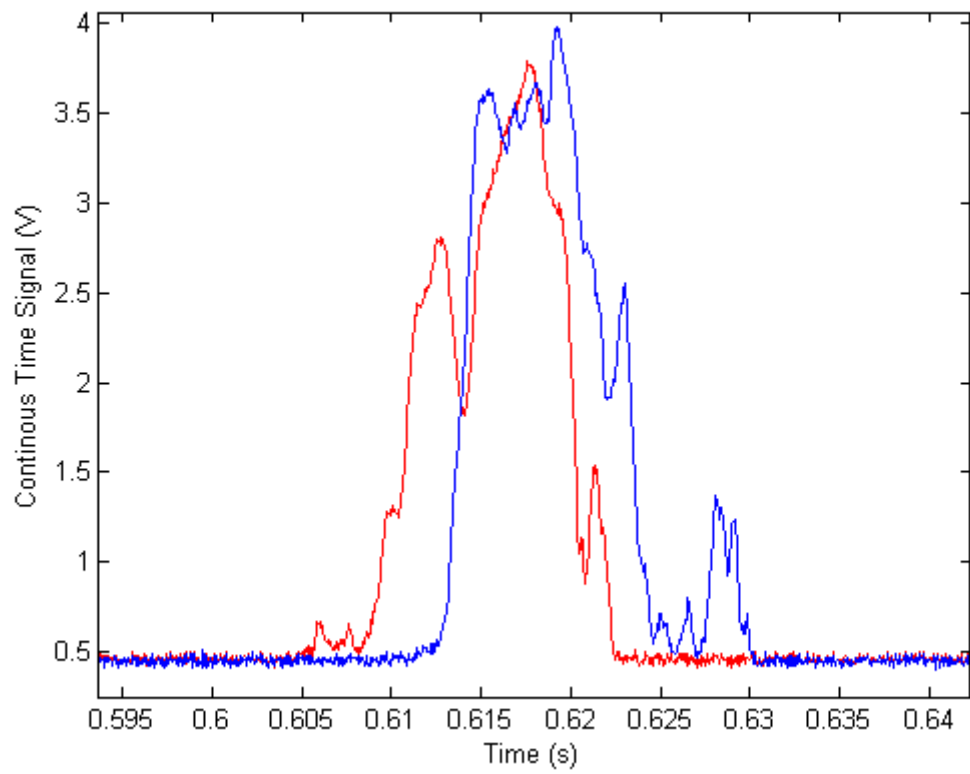
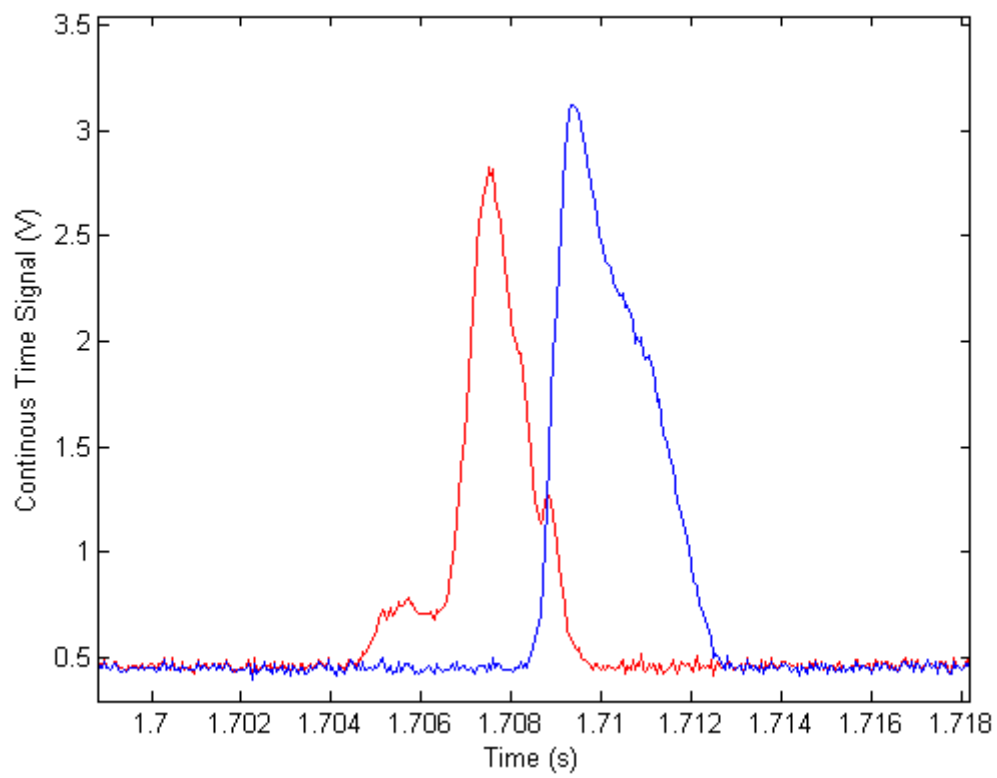


Figura 4.17. Señales pertenecientes a burbujas con la misma velocidad

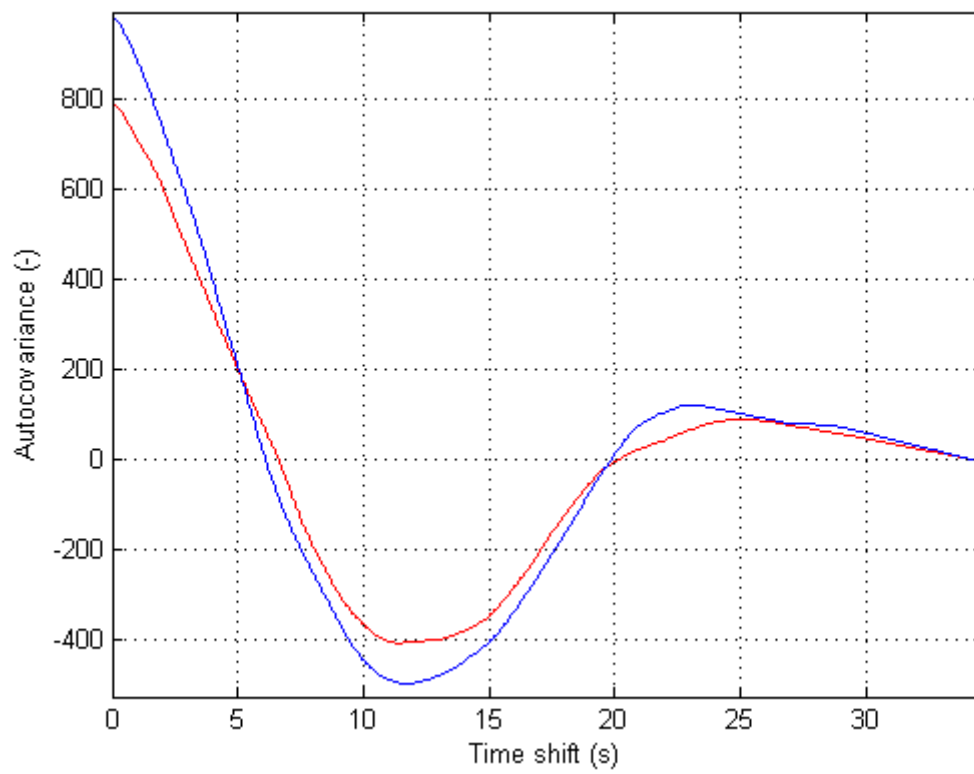
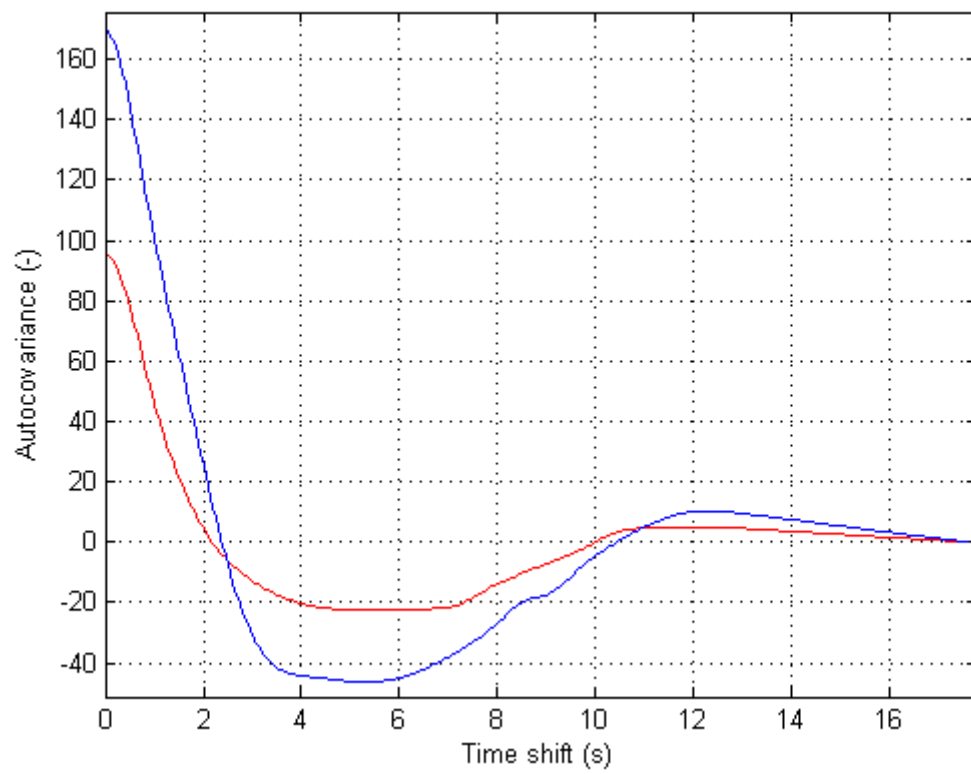


Figura 4.18. Función de autocorrelación de señales de Figura 4.17

También se ha analizado la manera en que afecta la velocidad de burbuja a la fracción de vacío de las mismas y se ha podido comprobar que a medida que aumenta la velocidad aumenta también la fracción de vacío.

Además, como se puede observar en la Figura 4.19 y en la Tabla 4.2, para una misma velocidad de burbuja cuanto mayor sea el máximo de la función de autocorrelación mayor será la fracción de vacío.

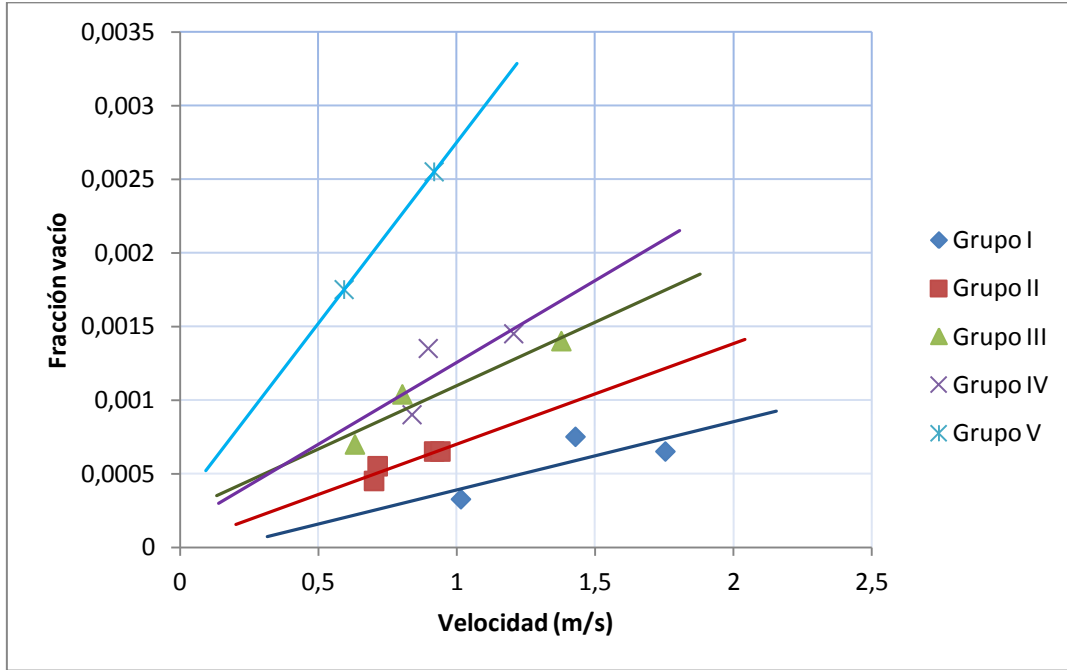


Figura 4.19. Función de autocorrelación de señales de Figura 4.17

### 4.3.3 Correlación cruzada

En vez de comparar una sola señal consigo misma como en el caso de la autocorrelación, con la correlación cruzada ( $C_{12}$ ) se van a comparar las dos señales que han sido adquiridas simultáneamente con las dos puntas de la sonda.

Restando en el eje X, el máximo de la función de autocorrelación de cualquiera de las dos señales (ya que coincide) al máximo de la función de correlación cruzada (FCC), obtendremos el valor del desfase ( $\tau$ ) entre las dos señales (Figura 4.20).

$$\tau = \max(C_{1,2}) - \max(C_{12})$$



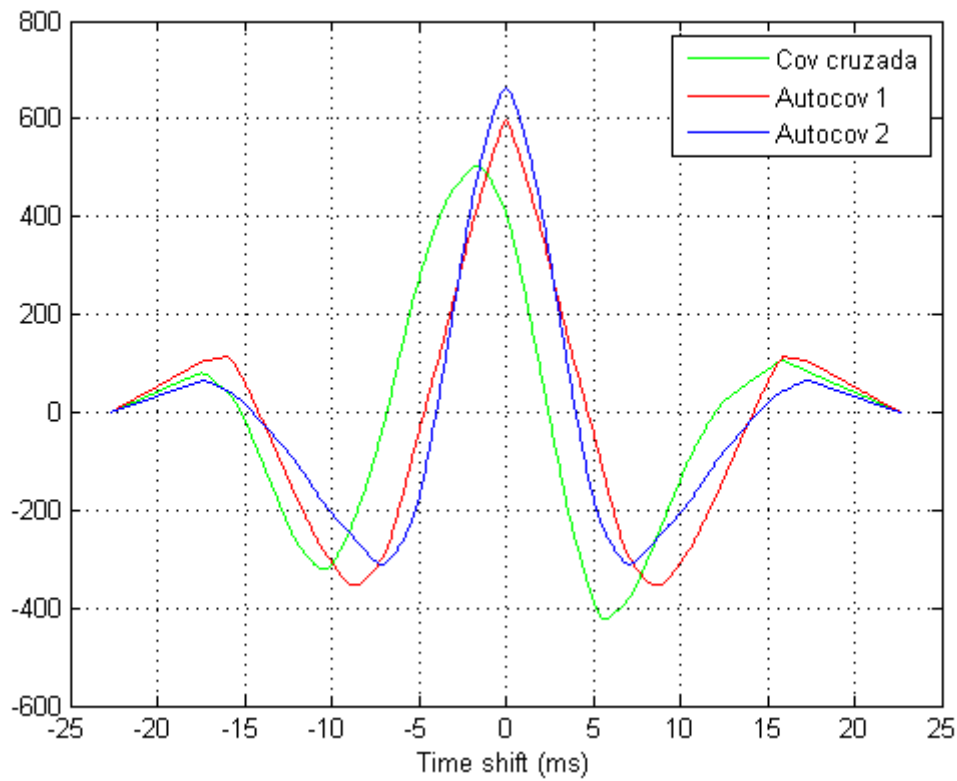


Figura 4.20. Funciones de autocorrelación y correlación cruzada

#### 4.3.4 Velocidad de burbuja

A partir del desfase de las dos señales, se podrá calcular la velocidad de la burbuja correspondiente, al ser conocida la distancia entre puntas de la sonda ( $l_{12}$ ), de la siguiente manera:

$$V_B = \frac{l_{12}}{\tau}$$

En un flujo complicado como el resalto hidráulico, donde existe inversión de flujo y recirculación, la detección de fase mediante sondas intrusivas tiene en cuenta de manera precisa la dirección y magnitud de la velocidad.

La mayoría de la sondas de una y dos puntas están diseñadas solamente para la medición de velocidades positivas, pero en nuestro experimento fue posible la detección de burbujas con velocidades negativas mediante el código en MATLAB, algo que el software PV6D no es capaz de obtener, dando error para dichas mediciones.

En la Figura 4.21 se muestra un ejemplo de señal con velocidad negativa, donde se aprecia que una de las dos señales se encuentra dentro de los límites de la otra. Esto se repite para todas las burbujas con velocidad negativa que se han obtenido.

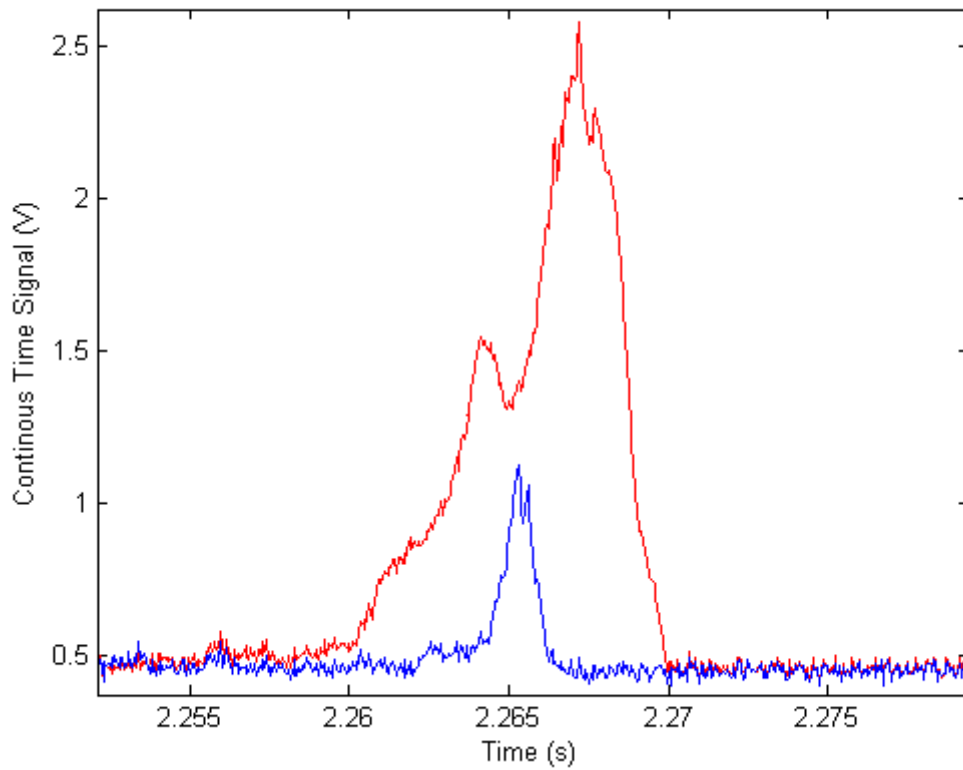


Figura 4.21. Señales correspondientes a una burbuja con velocidad negativa

A continuación se han representado las FAC y FCC de las señales anteriores donde se ve que el máximo de la correlación cruzada está desplazado a la derecha por lo que la velocidad de dicha burbuja será negativa.

Además, tal y como se comentaba anteriormente, en la Figura 4.23 se muestra el mismo trozo de señal pero procesado mediante el software PV6D donde se ve como no se obtiene ningún valor de velocidad al considerar que el desfase ( $\Delta t$ ) es cero. Por tanto, además de todas las ventajas mencionadas anteriormente en el uso de MATLAB frente a PV6D, la posibilidad de detectar burbujas con velocidades negativas es otra de las grandes ventajas que se han logrado en este proyecto.

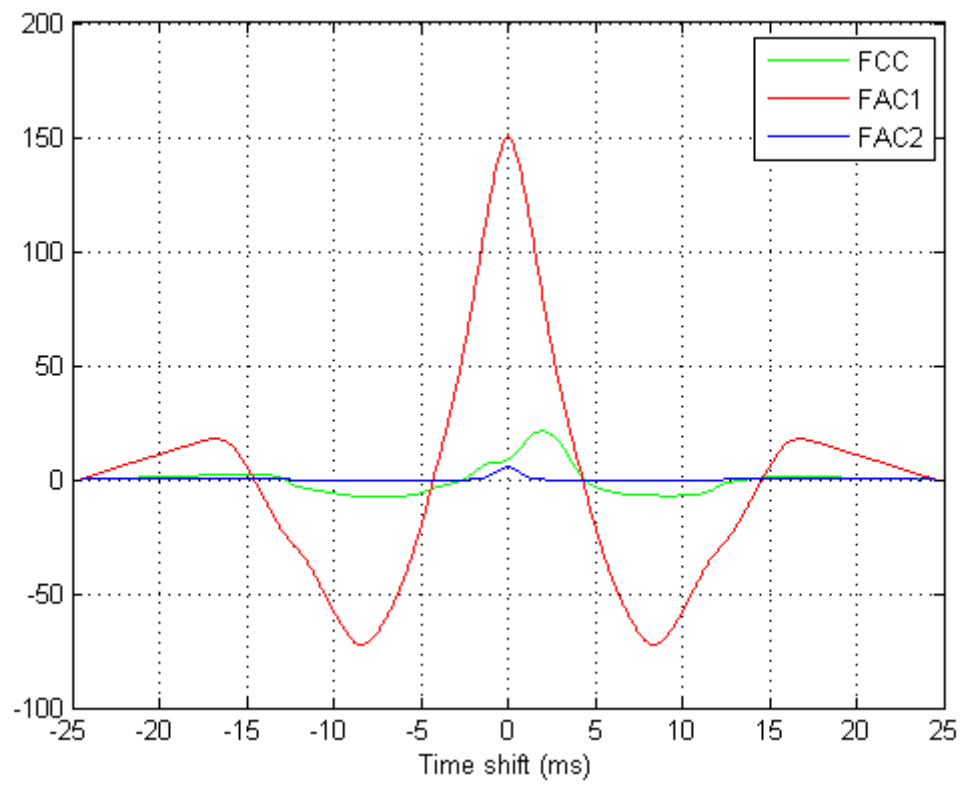
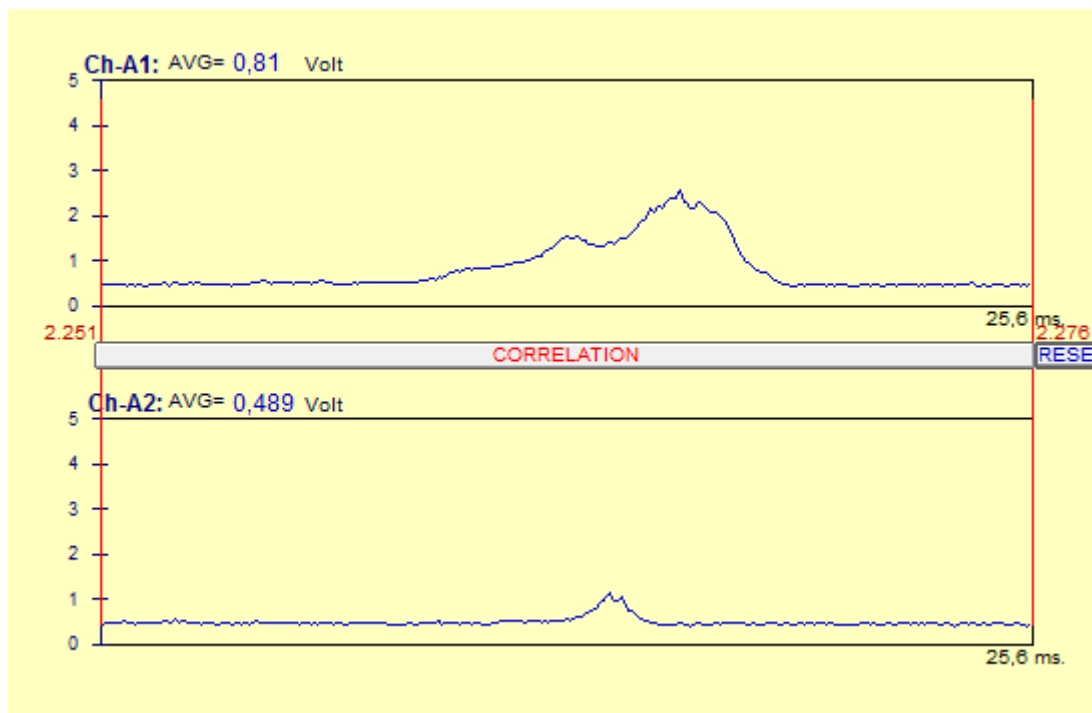


Figura 4.22. Correlación cruzada con máximo desplazado a la derecha



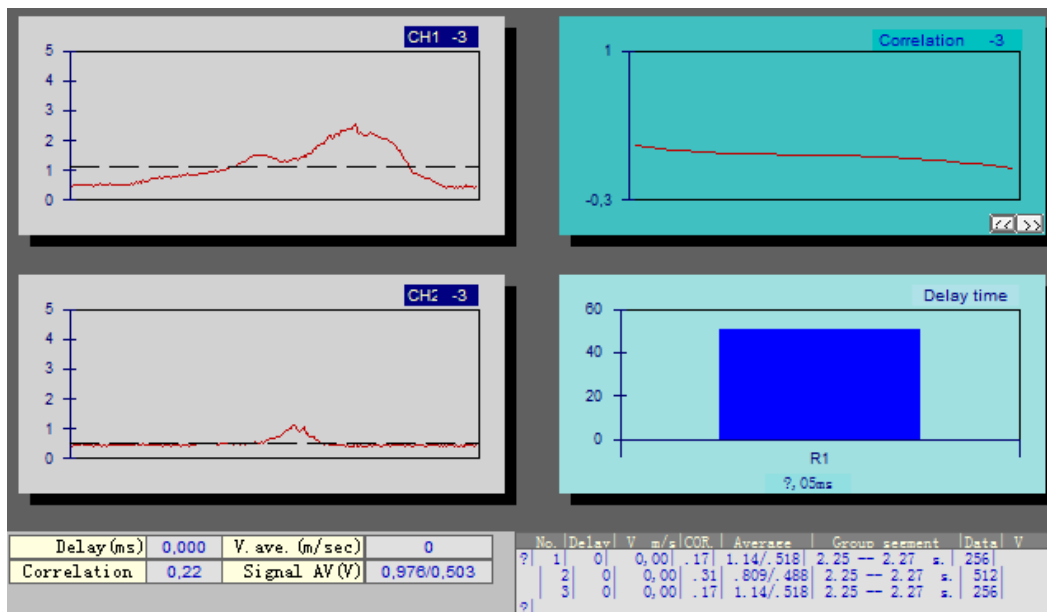


Figura 4.23. Procesado de señales en PV6D de una burbuja con velocidad negativa

### 4.3.5 Diámetro de burbuja

El diámetro de burbuja en este proyecto se ha considerado por aproximación, equivalente a la longitud de cuerda. Para el cálculo de este parámetro, se necesita el tiempo de cuerda de la burbuja  $T_B$ , que se define como el tiempo de duración de la punta del sensor dentro de la burbuja (ver apartado 4.2.2).

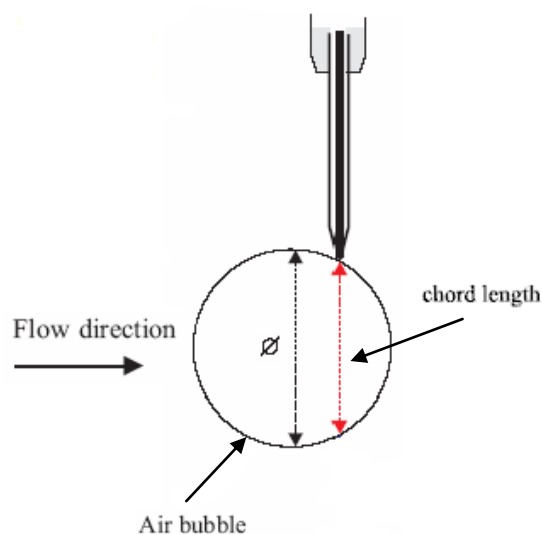


Figura 4.24. Diámetro de burbuja por aproximación

Este valor se ha obtenido para cada una de las burbujas, y con los valores de velocidad obtenidos anteriormente se podrá calcular la longitud de cuerda de la siguiente manera:

$$D_B \approx L_{ch} = V_B \cdot T_{ch}$$



# Capítulo:

## 5 Resultados

### 5.1 Procesamiento de señales

El tiempo de ajuste de cada canal, determinado por la respuesta de la sonda, el amplificador óptico y la circuitería de salida, es menor a  $1\ \mu\text{s}$ . Los datos de cada punta fueron obtenidos a una frecuencia de muestreo de 20 kHz (0,05 ms), para obtener medidas de fracciones de vacío, frecuencias de paso, velocidades y diámetros de burbuja.

En un flujo a baja velocidad, la burbuja más pequeña que se puede detectar es de un tamaño comparable al diámetro de las puntas de la sonda, sin embargo para flujos a altas velocidades el tamaño mínimo se obtiene en función del tiempo de ajuste y de la frecuencia de adquisición de datos. No existe un límite de tamaño máximo de burbuja detectable.

Las mediciones con la sonda óptica se realizaron en series cortas, de una duración de 6,55 segundos cada una. Dichas mediciones fueron realizadas tras haber transcurrido un cierto tiempo desde la puesta en funcionamiento de las bombas, para asegurar de esta manera la estabilidad en los resultados.

Se realizaron 9 mediciones (suficientes para registrar una buena cantidad de burbujas) con las mismas características de flujo y sin variar la posición de la sonda dentro del resalto hidráulico. A continuación, se muestra un ejemplo de los resultados que se han ido obteniendo en cada uno de los programas:

**Tiempo (s): 0,5454 – 0,577**

	PV6D	MATLAB
<b>U (m/seg)</b>	0,31	0,3138
<b>Correlación</b>	0,83	0,822
<b>Desfase (ms)</b>	6,15	6,15
<b>D<sub>Burbuja1</sub> (mm)</b>		7,94
<b>D<sub>Burbuja2</sub> (mm)</b>		5,87
<b>D/d</b>		1,35
<b>D<sub>Burbuja</sub> (mm)</b>		6,90
<b>F. Vacío 1</b>		0,0253
<b>F. Vacío 2</b>		0,0187

Tabla 5.1. Resultados obtenidos para un intervalo de tiempo donde hay burbuja

Para la creación de esta tabla primero se han volcado los resultados obtenidos en MATLAB ya que, como se dijo en el capítulo 4, con este programa se obtienen automáticamente todos los datos existentes en las señales, representados en la Tabla 5.1.

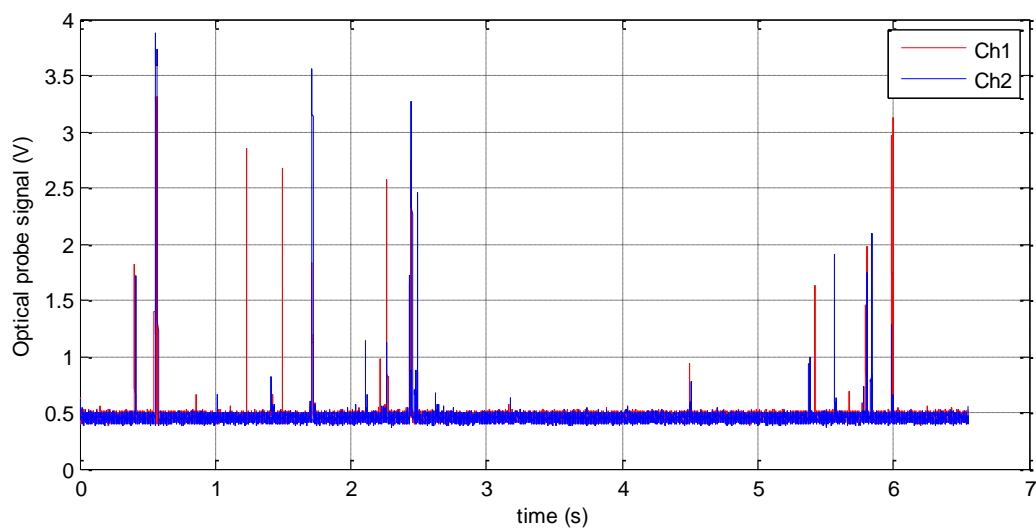


Figura 5.1. Señales en MATLAB de donde se extraerá la información automáticamente



Por tanto, una vez obtenidas las propiedades de las burbujas mediante MATLAB, podremos ir al programa PV6D e ir mirando manualmente en los intervalos de tiempo en los que MATLAB detectó la presencia de fase gaseosa, y de esta manera completar la tabla.

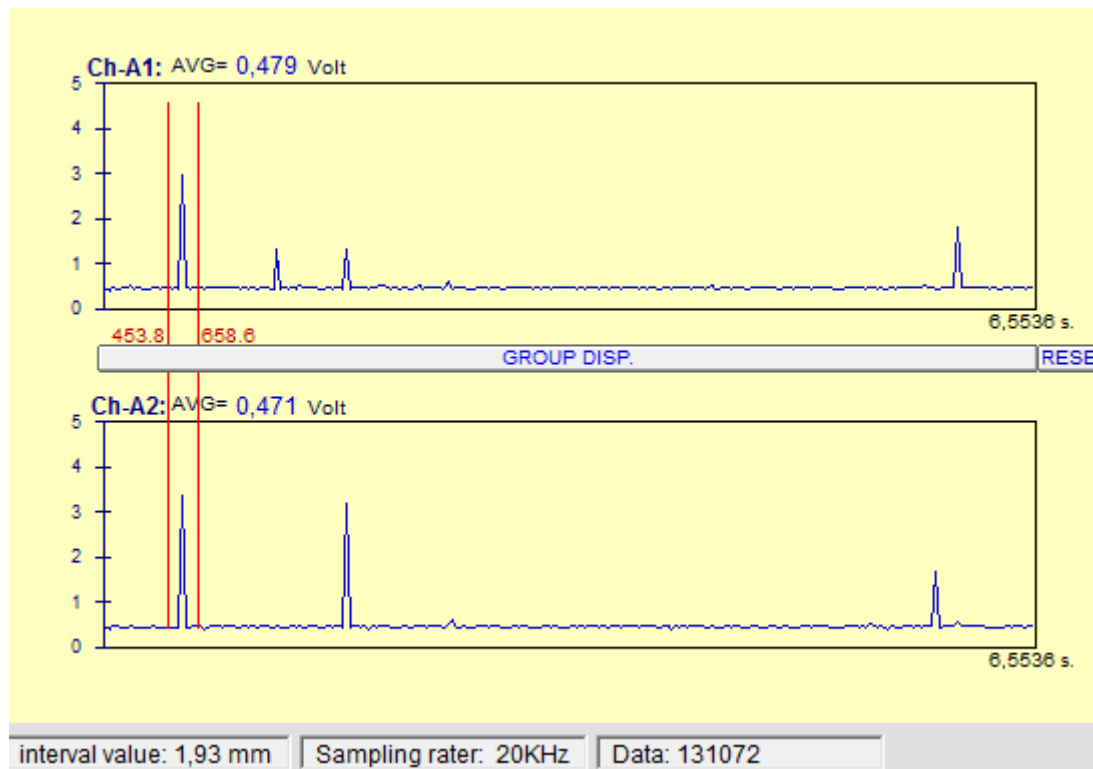


Figura 5.2. Señales en PV6D de donde se extraerá la información manualmente

Una vez extraída toda la información de las 9 señales correspondientes a las mediciones y ordenada adecuadamente según hemos visto en la tabla 5.1, se procederá al análisis de dicha información. En primer lugar, se establecerán unos criterios de validación que deberán cumplir los trozos de señal elegidos, de los cuales algo se adelantó en el capítulo 4 (ver Tabla 4.2):

- *Coeficiente de correlación*  $> 0,7$
- $D/d < 1,7$

Se deberán cumplir siempre “ambos” criterios de validación para poder dar por válidos los resultados correspondientes a dicha burbuja.

### 5.1.1 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es un parámetro de calidad de los datos de salida. La correlación se expresa como un porcentaje: la correlación perfecta indica una fiabilidad del 100% (en mediciones de velocidad con bajo ruido); la correlación 0% indica que el valor de velocidad de salida está dominado por el ruido (no hay señal coherente). La correlación puede usarse para revisar la calidad de los datos durante la recopilación y para editar datos en postprocesado.

Idealmente, los valores de correlación deben estar entre 70 y 100%. Valores por debajo del 70% indican que se está operando en un régimen de medida difícil. En ciertos entornos (flujos altamente turbulentos, agua altamente aireada), puede no ser posible lograr altos valores de correlación. Los valores de correlación bajos afectarán la variabilidad a corto plazo en los datos de velocidad (por ejemplo, aumento del ruido), pero no predisponen las mediciones de velocidad media. Para mediciones de velocidad media, valores de correlación tan bajos de hasta el 30% pueden usarse.

A continuación, se muestra un ejemplo de medida en la que no se alcanza una buena correlación entre señales, y por tanto dicha medida se despreciará a la hora de presentar los resultados (por eso aparece el NO en rojo en el diámetro de la burbuja, porque aún cumpliendo el criterio de  $D/d < 1,7$  no se podrá tener en cuenta dicho valor por no cumplir el criterio de correlación):

	PV6D	MATLAB
U (m/seg)	0,31	0,3138
Correlación	0,56	0,5777
Desfase (ms)	6,15	6,15
D burbuja1 (mm)		1,11
D burbuja2 (mm)		1,60
D/d		1,44
D bubble (mm)		NO
F. Vacío 1		0,0083
F. Vacío 2		0,0051

Tabla 5.2. Medida no válida por la baja correlación entre señales

### 5.1.2 Relación de diámetros, $D/d$

La relación de diámetros es un parámetro que compara el diámetro de burbuja detectado por cada sonda, siendo  $D$  el mayor valor detectado y  $d$  el menor. De esta manera desprecia valores muy altos de  $D/d$  que indica una mala detección de alguna de las dos puntas.

Al igual que con el criterio del coeficiente de correlación, si existe una buena correlación entre las dos señales pero la relación de diámetros es grande, dicha medida se despreciará como podemos ver en la Tabla 4.3.

	PV6D	MATLAB
<b>U (m/seg)</b>	0,3	0,3016
<b>Correlación</b>	0,77	0,7785
<b>Desfase (ms)</b>	6,35	6,4
$D_{\text{burbuja1}}$ (mm)		1,81
$D_{\text{burbuja2}}$ (mm)		0,196
<b><math>D/d</math></b>		9,23
$D_{\text{burbuja}}$ (mm)		NO
<b>F. Vacío 1</b>		0,0060
<b>F. Vacío 2</b>		0,0007

Tabla 5.3. Medida no válida por la alta relación de diámetros

## 5.2 Resultados

Una vez aplicados los criterios de validación anteriores a todas las burbujas que se han ido obteniendo mediante las mediciones, el número de burbujas válidas para proceder al análisis de los datos se reduce considerablemente. Aún así se dispone de una gran cantidad de datos de burbujas para mostrar resultados y sacar conclusiones coherentes.

En primer lugar, en la Figura 5.3 se representa el número de burbujas existentes en cada uno de los rangos de tamaño definidos de 1 mm cada uno. Como se puede apreciar, la mayor parte de las burbujas detectadas por la sonda óptica tienen un tamaño de entre 1 y 4 mm.

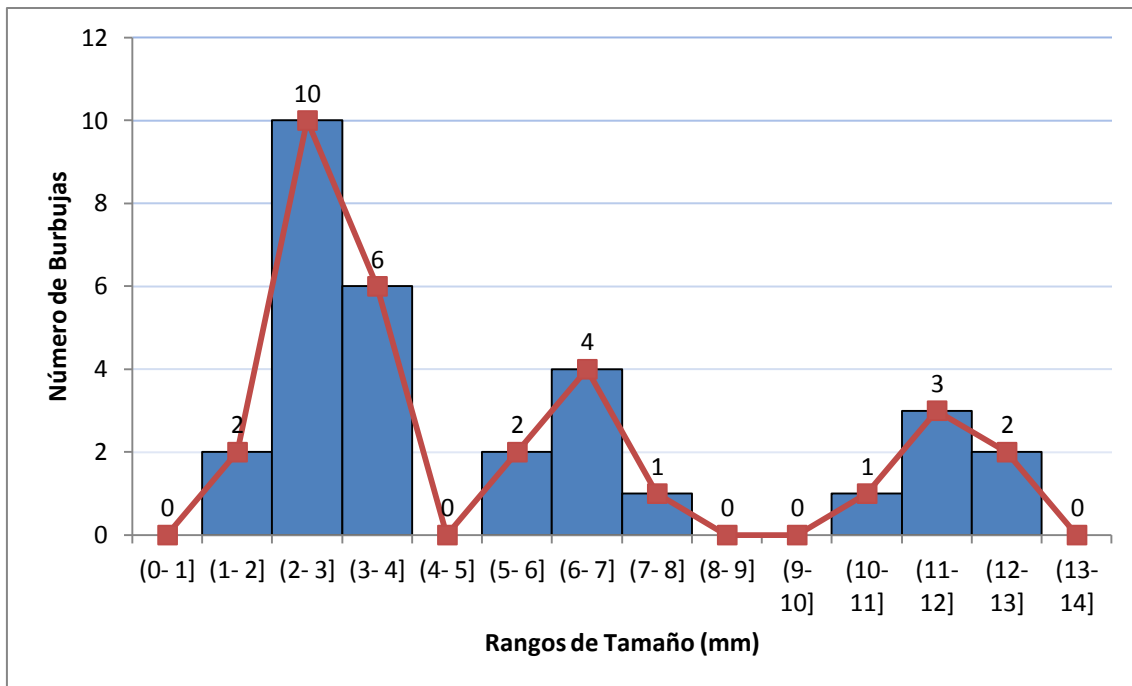


Figura 5.3. Tamaños de burbuja

También se ha representado el número de burbujas existentes para diferentes rangos de velocidad, resultando que la mayor parte de las burbujas tienen una velocidad entre 0,4 y 1,2 m/s.

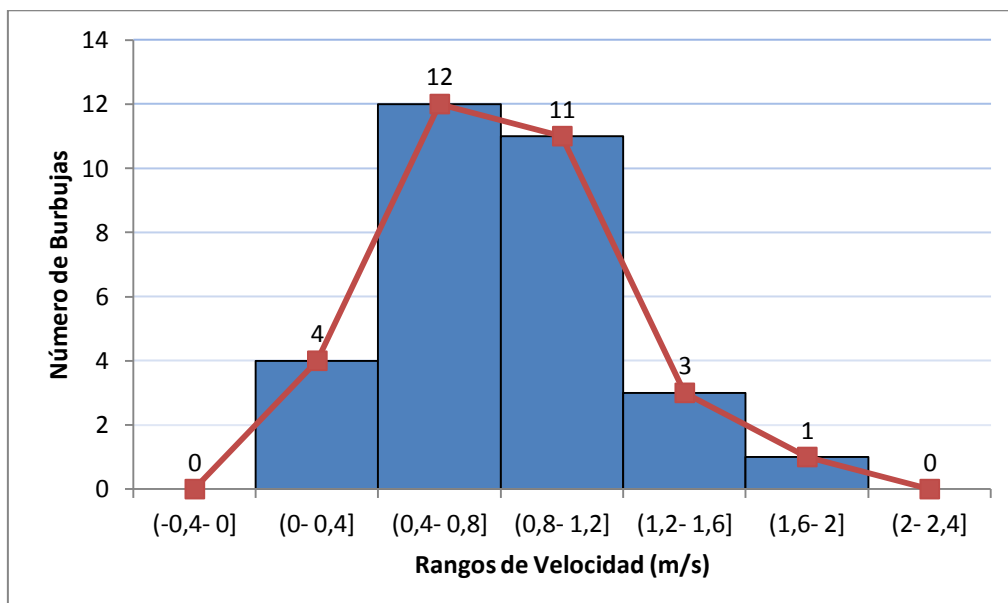


Figura 5.4. Velocidades de burbuja

Otro resultado a destacar es ver como la velocidad de burbuja aumenta a medida que aumenta el diámetro. Esto era de esperar ya que, como vimos en el capítulo 4 ocurría lo mismo para la fracción de vacío, que al ser directamente proporcional a la longitud de cuerda lo será también con el diámetro de burbuja.

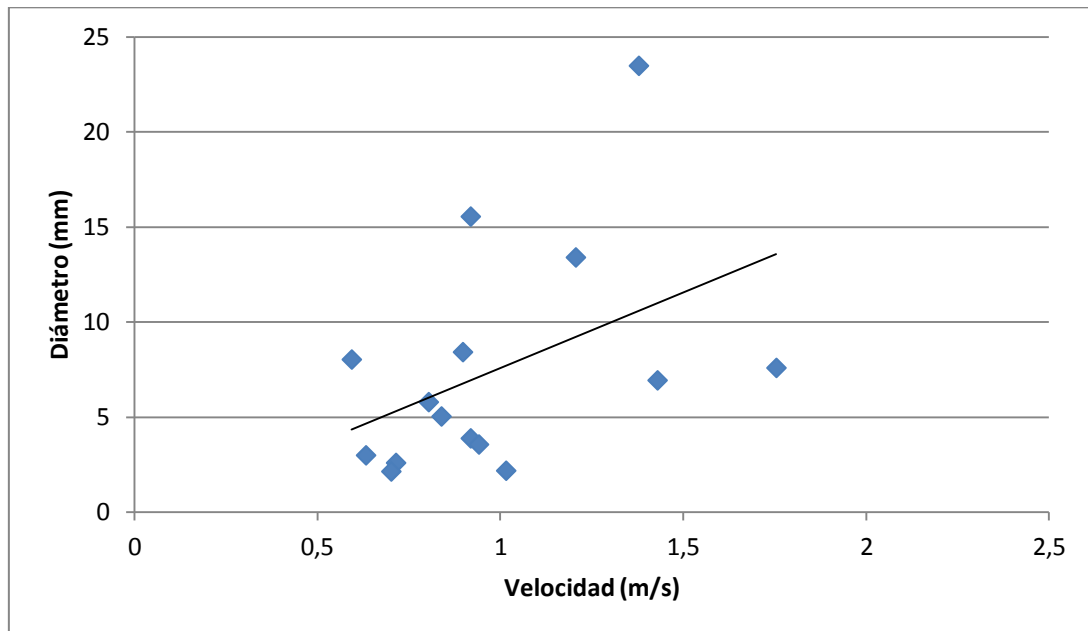


Figura 5.5. Velocidad vs Diámetro de burbuja

# Capítulo:

## 6 Conclusiones

Las sondas ópticas son técnicas experimentales muy apropiadas para el estudio de la dinámica de la fase gaseosa dentro de un resalto hidráulico. Combinando la utilización de este tipo de sondas junto con técnicas de correlación, se han obtenido de manera muy precisa las características de las burbujas.

La dinámica de las burbujas se ha estudiado aplicando el análisis de correlación a las señales temporales proporcionadas por las sondas ópticas. Para desfases temporales pequeños (hasta aproximadamente la media del tiempo de paso de burbujas) la función de autocorrelación tiene forma triangular. En flujos burbujeantes de régimen turbulento como el resalto hidráulico, se forman “agrupaciones de burbujas” cuya escala típica de tiempos se encuentra a continuación de la escala de tiempo de la burbuja principal, indicando la presencia de vórtices o agrupaciones de burbujas.

Se ha comprobado que para velocidades de burbuja bajas, la función de autocorrelación corta en cero rápidamente, mientras que para velocidades más altas permanece positiva durante mucho más tiempo. También se ha analizado cómo afecta la velocidad de burbuja a la fracción de vacío de las mismas, y se ha podido comprobar que a medida que aumenta la velocidad aumenta también la fracción de vacío.

A partir de la función de correlación cruzada se ha obtenido el desfase entre las dos señales, con el que se ha obtenido la velocidad de la burbuja correspondiente, al ser conocida la distancia entre puntas de la sonda.

El diámetro de burbuja se ha obtenido a partir de la velocidad, considerando la longitud de cuerda equivalente al diámetro ya que se han considerado las burbujas como esféricas.

Para la obtención de dichas características de burbuja, se ha elaborado un complejo código de programación en MATLAB para comparar los resultados obtenidos con los de un software comercial específico para dichas sondas. Analizados los resultados arrojados por ambos programas se ha podido comprobar que la utilización de MATLAB es mucho más completa y precisa y además permite capturar las velocidades negativas que el otro software sin embargo es incapaz.





# Glosario

PD	<i>Parcialmente desarrollado</i>
FD	<i>Completamente desarrollado</i>
LIF	<i>Fluorescencia Inducida por Láser</i>
PTV	<i>Velocimetría por Seguimiento de Partículas</i>
LDV	<i>Velocimetría Láser Doppler</i>
PIV	<i>Velocimetría por Imágenes de Partículas</i>
PV6D	<i>Particle Velocity Measurer</i>
FCC	<i>Función de Correlación Cruzada</i>
FAC	<i>Función de Autocorrelación</i>

# Referencias

- [1] Prosperetti A, Tryggvason G. “Computational methods for multiphase flow”, *Cambridge University Press*, 2007
- [2] Gualtieri C., Chanson H. “Experimental analysis of Froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump”, *Environmental Fluid Mechanics*, 2007
- [3] Rajaratnam N. “An experimental study of air entrainment characteristics of the hydraulic jump”, *Journal of Instrumental Engineering*, The Institution of Engineers (India), 1962
- [4] Resch F.J. Leutheusser H.J. “Reynolds stress measurements in hydraulic jumps”, *Journal of Hydraulic Research*, 1972
- [5] Murzyn F., Mouazé D., Chaplin J.R. “Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps”, *International Journal of Multiphase Flow*, 2005
- [6] Babb A.F., Aus H.C. “Measurements of air in flowing water”, *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 1981
- [7] Chanson H., Brattberg T. “Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump”, *International Journal of Multiphase Flow*, 2000
- [8] Chanson H. “Bubbly flow structure in hydraulic jump”, *European Journal of Mechanics*, 2007
- [9] Murzyn F., Mouaze D., Chaplin J.R. “Air-water interface dynamic and free surface features in hydraulic jumps”, *Journal of Hydraulic Research*, 2007
- [10] Mossa M. Tolve U. “Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump”, *Journal of Fluids Engineering*, 1998

- [11] Lennon J.M., Hill D.F. “Particle Image Velocity measurements of undular and hydraulic jumps”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006
- [12] Liu M., Zhu D.Z., Rajaratnam N. “Evaluation of ADV measurements in bubbly two phase flows”, *Conference on Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, 2002.
- [13] Celia Sobrino Fernández, “Experimental study of a bubbling fluidized bed with a rotating distributor”, *Tesis doctoral*, 2008
- [14] Ana Medina Palomo, “Caracterización experimental de capas de mezcla en saltos hidráulicos”, *Proyecto fin de carrera*, 2008

